

AALTO-YLIOPISTO  
TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Rauno Hirvonen

## SÄHKÖASEMAN ENSIÖPUOLEN SUUNNITTELUSSA KÄYTETTÄ- VIEN LASKENTAMENETELMIEN KEHITTÄMINEN

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa 15.3.2010

Työn valvoja:      Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaaja:      DI Jorma Eskola

Tekijä: Rauno Hirvonen

Työn nimi: Sähköaseman ensiöpuolen suunnittelussa käytettävien  
laskentamenetelmien kehittäminen

Päivämäärä: 15.3.2010

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 9+69

Tiedekunta: Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Professuuri: Sähköasemat ja -johdot

Koodi: S-18

Valvoja: Prof. Matti Lehtonen

Ohjaaja: DI Jorma Eskola

Tässä työssä on tutkittu sähköaseman ensiöpuolen suunnitteluun liittyviä laskelmia, joista keskeisimmän osan muodostavat materiaalien ja laitteiden sekä niiden tukirakenteiden mitoituslaskelmat. Näiden laskelmien avulla pyritään varmistumaan siitä, että sähköasema kestää riittävällä luotettavuudella ja taloudelliset näkökohdat huomioon ottaen kaikki todennäköiset rasitukset, jotka siihen kohdistuvat rakennusvaiheen ja käytön aikana. Työn teoreettisen perustan muodostavat lähinnä aiheeseen liittyvät SFS:n ja IEC:n standardit sekä CIGRÉ:n julkaisut. Käytännön näkökulma tulee puolestaan etupäässä ABB Oy Sähköasemat -yksiköstä ja heidän vuosikymmenten aikana hankkimastaan kokemuksesta sähköasemarakentamisessa niin Suomessa kuin ulkomaillaakin.

Työ tuloksena on saatu kokonaisvaltainen kuva sähköaseman ensiöpuolen suunnitteluun liittyvistä tärkeimmistä laskelmista, niiden perusteista ja toteutustavoista. Työn käytännön sovelluksena on tehty Excel-ohjelma oikosulun mekaanisten ja termisten vaikutusten laskemiseksi.

Saatuja tuloksia voidaan hyödyntää uusien laskentamenetelmien kehittämisessä sekä vanhojen parantamisessa tavoitteenaan suunnittelun tehostaminen ja laadun parantaminen.

Avainsanat: sähköasema, suunnittelu, laskelma, oikosulku

Author: Rauno Hirvonen

Title: Development of calculation methods for substation primary engineering

Date: 15.3.2010

Language: Finnish

Number of pages: 9+69

Faculty: Faculty of Electronics, Communications and Automation

Professorship: Substations and overhead lines

Code: S-18

Supervisor: Prof. Matti Lehtonen, Dr.Sc. (Tech.)

Instructor: Jorma Eskola, M. Sc. (Tech.)

This thesis examines calculations used for planning the primary side of a substation. The essential part of these calculations consists of dimensioning material, equipment and their supporting structures. The purpose of the calculations is to ensure that the substation withstands all possible stresses during the construction period and in normal usage remaining sufficient reliability and taking account the economical aspects. Theoretical basis of this thesis rests mostly on relevant SFS and IEC standards as well as CIGRÉ publications. The practical aspect on the other hand comes mainly from ABB Oy Substations and their many decades long experience from substation projects in Finland and abroad.

This thesis gives a comprehensive picture of the most important calculations, their basis and implementation methods needed for planning the primary side of a substation. As a practical application an Excel-based program for calculating short-circuit effects is presented.

The results of this thesis can be used for developing new calculation methods and improving the existing ones targeting enhanced design and improved quality in substation engineering.

Keywords: substation, design, calculation, short-circuit

# Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy Sähköasemat -yksikössä opinnäytetyöksi Aalto-yliopiston teknillisen korkeakoulun elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunnalle.

Diplomityön aiheen valintaan ovat vaikuttaneet omat pyrkimykseni laajentaa osaamistani sähköaseman ensiöpuolen suunnitteluun työskenneltyäni yli kahdenkymmenen vuoden ajan sähköaseman toisiojärjestelmiin liittyvissä tehtävissä. Tämän lisäksi kiinnostukseni laskelmien tekemisestä ja tietokoneohjelmoinnista ovat puoltaneet aiheen valintaa.

Haluan kiittää työni valvojaa professori Matti Lehtosta ja ohjaajaa DI Jorma Eskola saamastani tuesta ja neuvoista tämän diplomityön tekemisessä. Samalla haluan lausua kiitokseni myös muille Sähköasemat-yksikön henkilökunnalle ja työtovereille, jotka ovat edesauttaneet tämän diplomityön valmistumisessa ja tässä suhteessa varsinkin ensiöpuolen suunnittelun esimiehelle Seppo Pastolle ja suunnittelija Nils Österholmille.

Mustasaarella 15.3.2010

Rauno Hirvonen

# Sisältö

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>iii</b>
<b>Esipuhe</b>	<b>iv</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>v</b>
<b>Symbolit ja lyhenteet</b>	<b>vii</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Teoreettinen tausta</b>	<b>5</b>
2.1 Yleistä . . . . .	5
2.2 Vaatimukset . . . . .	6
2.3 Oikosulkulaskelmat . . . . .	9
2.3.1 Oikosulkuvirta . . . . .	9
2.3.2 Oikosulkuvoimat . . . . .	12
2.3.3 Mekaaniset vaikutukset . . . . .	18
2.3.4 Termiset vaikutukset . . . . .	30
2.4 Taipuma- ja riippumalaskelmat . . . . .	32
2.5 Koronalaskelmat . . . . .	36
2.6 Ukkossuojaus . . . . .	37
2.7 Maadoituslaskelmat . . . . .	38
2.8 Maajäritysten vaikutusten laskenta . . . . .	41
2.9 Melun laskenta . . . . .	43
2.10 Teräsrakenne- ja perustuslaskelmat . . . . .	43
<b>3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät</b>	<b>45</b>
<b>4 Tulokset</b>	<b>47</b>
4.1 Vastaukset tutkimuskysymyksiin . . . . .	47
4.1.1 Mitä laskelmia tarvitaan? . . . . .	47
4.1.2 Mitkä ovat näiden laskelmien taustalla olevat teorialat? . . . . .	50
4.1.3 Miten laskelmat nykyisellään tehdään? . . . . .	51

4.1.4	Miten nykyisiä laskentamenetelmiä voitaisiin kehittää? . . . .	52
4.1.5	Mitä valmiita laskentasovellutuksia markkinoilta löytyy? . . .	53
4.2	Laskentaohjelman suunnittelu . . . . .	55
4.2.1	IEC865_mrt.xlsm - mekaaniset vaikutukset putkille . . . . .	57
4.2.2	IEC865_mfc.xlsm - mekaaniset vaikutukset köysille . . . . .	58
4.2.3	IEC865_tbc.xlsm - termiset vaikutukset paljaille johtimille . .	60
4.2.4	Testaus . . . . .	61
4.2.5	Jatkokehitys . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>64</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>66</b>
	<b>Liite A</b>	<b>68</b>
	<b>Liite B</b>	<b>69</b>

# Symbolit ja lyhenteet

## Symbolit

$\alpha$	tuennan vaikutuksen huomioiva kerroin kiskon tukipisteen voimaan
$\beta$	tuennan vaikutuksen huomioiva kerroin kiskon rasitukseen
$\epsilon$	lineaarinen lämpöpiteneemiskerroin
$\gamma$	tuennan huomioiva kerroin kiskon ominaistaaajuuteen
$\gamma_z$	oikosulkupiirin impedanssin vaihekulma
$\hbar$	tärkeyskerroin seismiseen voimaan
$\kappa$	oikosulkuvirran sysäyskerroin
$\mu_0$	tyhjiön permeabiliteetti
$\nu_2, \nu_3$	supistusvoiman laskennassa käytettäviä kertoimia
$\omega$	kulmataajuus
$\rho$	painovoima pinta- ja pituusyksikköä kohden
$\rho_E$	maaperän resistiivisyys
$\sigma_g$	kiskon oman painon aiheuttama taivutusrasitus
$\sigma_m$	kiskon taivutusrasitus oikosulussa
$\sigma_s$	osajohtimen taivutusrasitus oikosulussa
$\sigma_{tot}$	kiskon kokonaistaivutusrasitus oikosulussa
$\sigma_w$	tuulikuorma
$\sigma_x$	köyden vetorasituksen vaakakomponentti
$\tau$	oikosulkupiirin aikavakio
$\varphi_u$	jännitteen vaihekulma
$\vartheta$	lämpenemä tai lämpötila
$3I_0$	johdon tai kaapelin syöttämä maasulkuvirta
$A$	johtimen poikkipinta-ala
$a$	johtimien keskilinjien välinen etäisyys
$a_m$	kiskojen keskilinjien välinen tehollinen etäisyys
$a_s$	osajohdinten keskilinjien välinen tehollinen etäisyys
$B$	magneettivuon tiheys
$b_c$	köyden staattinen riippuma
$b_h$	köyden maksimi horisontaalinen siirtymä
$c$	osajohdinten yhdyssiteiden vaikutuksen huomioiva kerroin kiskon ominaistaaajuuteen tai johtimen ominaislämpökapasiteetti
$D$	putkikiskon ulkohalkaisija tai maadoitusverkon halkaisija
$E$	kimmokerroin tai sähkökentän voimakkuus
$F$	johtimien välinen voima
$f$	sähköjärjestelmän taajuus tai kiskon taipuma
$F'$	luonteenomainen sähkömagn. voima pituusyksikköä kohden köydellä
$F_b$	horisontaalinen seisminen voima
$F_d$	jäykän kiskon tukieristimeen kohdistuva oikosulkuvoima
$F_f$	köyden pudotusvoima
$F_{m2}$	kiskoon kohdistuva voima kaksivaiheisessa oikosulussa
$F_{m3}$	keskimmäiseen kiskoon kohdistuva voima symmetrisessä oikosulussa

$F_{pi}$	nippuköyden supistusvoima
$F_s$	uloimmaiseen osajohtimeen kohdistuva voima oikosulussa
$F_{st}$	staattinen köysivoima
$F_t$	köysivoima oikosulussa
$F_v$	osajohdinten välinen oikosulkuvoima nippuköydellä
$f_c$	kiskon ominaistajuus
$g_n$	maan vetovoiman kiihtyvyys
$h$	johtimen korkeus maan pinnasta
$i$	tuennan vaikutuksen huomioiva kerroin kiskon taipumaan
$i(t)$	virran hetkellisarvo
$I_k''$	alkuoikosulkuvirta
$I_B$	kehon kautta kulkeva virta
$I_b$	symmetrisen oikosulkuvirran katkaisuvirta
$I_{BP}$	sallittu kehon kautta kulkeva virta
$i_{dc}$	oikosulkuvirran tasakomponentti
$I_{dyn}$	dynaaminen oikosulkuvirta
$I_E$	maavirta
$I_k$	jatkuvan tilan oikosulkuvirta
$i_p$	sysäysoikosulkuvirta
$I_{th}$	ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta
$I_{thr}$	nimellinen lyhytaikaisen virran kestoisuus
$J$	aksiaalinen pintamomentti
$k$	tuennan vaikutuksen huomioiva kerroin kiskon oman painon aiheuttamaan rasitukseen
$L$	maadoituselektrodin pituus
$l$	tukieristimien keskilinjoiden välinen etäisyys
$l_c$	johtimen pituus jännevälillä
$l_i$	eristinketjun pituus
$L_{PA}$	A-painotettu äänipainetaso
$l_s$	osajohdinten yhdyssiteiden keskilinjoiden välinen etäisyys tai yhdyssiteen etäisyys viereiseen tukieristimeen
$L_{WA}$	A-painotettu äänitehotaso
$m$	oikosulkuvirran tasakomponentin lämpövaikutuksen huomioiva kerroin
$m'$	massa pituusyksikköä kohden
$n$	oikosulkuvirran vaihtokomponentin lämpövaikutuksen huomioiva kerroin tai lukumäärä
$q$	elastisuuserroin
$q_0$	tuulen paine
$Q_w$	tuulikuorma
$r$	johtimen resistanssi pituusyksikköä kohden
$r_E$	reduktiokerroin
$R_{ES}$	maadoitusresistanssi
$r_L$	johtimen säde
$R_{p0.2}$	kiskomateriaalin myötöraja
$s$	putken seinämän paksuus



$S_d(T_1)$	suunnitteluvastespektri
$S_{th}$	ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirran tiheys
$S_{thr}$	nimellinen lyhytaikaisen virrantiheyden kestoisuus
$t$	aika
$T_f$	köyden putoamishetki oikosulun alkuhetkestä
$T_k$	oikosulkuvirran kesto aika
$T_{kr}$	nimellinen oikosulkuvirran kesto aika
$T_{pi}$	nipun supistushetki oikosulun alkuhetkestä
$T_t$	köysivoiman huippuhetki oikosulun alkuhetkestä
$U$	jännite
$U_E$	maadoitusjännite
$U_T$	kosketusjännite
$U_{TP}$	sallittu kosketusjännite
$V_\sigma$	värähtelyn vaikutuksen huomioiva kerroin kiskon rasitukseen
$V_{\sigma s}$	värähtelyn vaikutuksen huomioiva kerroin osajohtimen rasitukseen
$V_F$	värähtelyn vaikutuksen huomioiva kerroin tukieristimen rasitukseen
$V_r$	jälleenkytkennät huomioiva kerroin kiskon rasitukseen
$V_{rs}$	jälleenkytkennät huomioiva kerroin osajohtimen rasitukseen
$Z$	kiskon taivutusvastus
$Z_\infty$	ilmajohdon ukkosjohtimen/pylväsmaadoituksen impedanssi
$Z_{ES}$	maadoitusimpedanssi
$Z_s$	osajohtimen taivutusvastus

## Operaattorit

$\frac{d}{dx}$	derivaatta muuttujan $x$ suhteen
$\frac{\partial}{\partial x}$	osittaisderivaatta muuttujan $x$ suhteen
$\mathbf{A} \times \mathbf{B}$	vektorien $\mathbf{A}$ ja $\mathbf{B}$ ristitulo

## Lyhenteet

AC	vaihtovirta
DC	tasavirta
HV	suurjännite
MV	keskijännite
LV	pienjännite
k1	vaiheen ja maan välinen oikosulku eli maasulku
k2	kaksivaiheinen oikosulku
k3	kolmivaiheinen oikosulku
r	nimellisarvo

# 1 Johdanto

ABB Oy Sähköasemat -yksikkö Vaasassa toimittaa sähköasemia eri puolille maailmaa. Sähköasemat toimitetaan yleensä avaimet käteen -periaatteella, eli toimitukseen kuuluu kaikki sähköaseman rakentamiseen tarvittavat laitteet ja tarvikkeet sekä työ alkaen suunnittelusta aina käyttökoulutukseen asti.

Sähköasemien suunnittelu on Sähköasemat -yksikössä jaettu karkeasti ottaen kahteen osa-alueeseen: ensiöpuoleen ja toisiopuoleen. Ensiöpuolen suunnittelu vastaa kaikesta ensiöpuolen rakentamiseen tarvittavasta suunnittelusta ja toisiopuolen suunnittelu vastaavasti kaikesta mikä liittyy toisiopuoleen. Toisiopuolen suunnittelu vastaa lisäksi näiden kahden osa-alueen yhteensovittamisesta eli rajapinnasta.

Ensiöpuolen suunnittelu koostuu sekä sähköteknisestä että rakennusteknisestä suunnittelusta ja sen vastuualueelle kuuluu em. mukaisesti

- ensiölaitteet ja -tarvikkeet
- ensiölaitteiden tukirakenteet ja perustukset
- maadoitusjärjestelmä
- ukkossuojaus
- valvomorakennus
- maanrakennus.

Toisiopuolen suunnitteluun kuuluu periaatteessa kaikki muu eli toisilaitteet, toisio-kaapelit, kojekaapit, jne. Lisäksi – yllä olevasta listasta poiketen – pääosa ensiölaitteiden hankintoihin liittyvistä tehtävistä kuuluvat toisiopuolen suunnitteluun, koska siihen liittyviä määrityksiä on yleensä ensiöpuoleen verrattuna enemmän. Tätä suunnittelun jakoa ensiö- ja toisiopuoleen on havainnollistettu graafisesti liitteessä [A](#).

Suunnitteluun liittyy oleellisena osana mitoituskalkylat, jotka yhdessä taloudellisten laskelmien kanssa toimivat perustana materiaalien, laitteiden ja rakenteiden valinnalle sekä varsinaisten suunnitteludokumenttien tekemiselle. Näiden mitoituskalkylmien lisäksi tehdään määrälaskelmia, jotka liittyvät mm. tarjouksiin, hankintoihin ja kuljetuksiin.

Laskelmia tehdään edelleen suuressa määrin käsin taskulaskinta hyväksi käyttäen, mikä yksinkertaisissa tapauksissa onkin ihan hyvä tapa. Vaikeammat tapaukset kannattaa kuitenkin siirtää erilaisiin laskentapohjiin (esim. Excel tai Mathcad), varsinkin jos ne toistuvat usein. Oikein monimutkaisista laskutoimituksista voi olla järkevää tehdä jo jonkinlainen tietokoneohjelma tai ostaa sellainen, jos niitä löytyy

kaupasta kohtuulliseen hintaan.

Näiden valmiiden laskentapohjien ja tietokoneohjelmien kanssa pitää kuitenkin olla huolellinen, että syöttää lähtöarvot niihin oikein ja tulkitsee niiden tuloksia oikealla tavalla. Monesti nämä valmiit laskentapohjat ja tietokoneohjelmat eivät ihan täsmällisesti vastaa sitä käytännön tapausta, mitä halutaan laskea, jolloin tarkkuus lähtöarvojen syötössä ja tulosten tulkinnessa korostuu. Tällöin on ensiarvoisen tärkeää tuntea myös näihin laskelmiin liittyvät teoreettiset taustat.

### **Tutkimuksen tavoite ja rajaus**

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kehittää ABB Oy Sähköasemat -yksikön ensiöpuolen suunnittelussa käytettäviä laskentamenetelmiä, jotka liittyvät materiaalien, laitteiden sekä niiden tukirakenteiden mitoittamiseen ja valintaan. Laskentamenetelmien kehittämisellä pyritään tehostamaan sähköasemien suunnittelua ja parantamaan sen laatua.

Tässä työssä keskitytään ulos asennettaviin, ilmaeristeisiin sähköasemiin eli ns. ulkokytkinlaitoksiin, ja tutkimuksen avulla pyritään löytämään vastaukset seuraaviin kysymyksiin:

1. Mitä laskelmia sähköaseman ensiöpuolen suunnittelussa tarvitaan?
2. Mitkä ovat näiden laskelmien taustalla olevat teoriat?
3. Miten laskelmat nykyisellään tehdään?
4. Miten nykyisiä laskentamenetelmiä voitaisiin kehittää?
5. Mitä valmiita laskentasovellutuksia markkinoilta löytyy?

Teoreettisten taustojen selvittelyssä työn painopiste on tutkimusalueen sähköteknisissä laskelmissa, ja varsinaisten laskentamenetelmien kehittämisessä keskitytään lähinnä oikosulkuun liittyvien mekaanisten ja termisten vaikutusten laskentaan.

### **Tutkimuksen taustaa**

Sähköaseman laitteiden ja rakenteiden on luonnollisesti kestävä normaalista käytöstä aiheutuvat rasitukset, mutta tämän lisäksi niiden on siedettävä myös lyhytaikaisia poikkeustilanteita. Tällaisia poikkeustilanteita synnyttävät mm. oikosulut ja erilaiset sääilmiöt sekä seismisillä alueilla lisäksi maanjäristykset.

Oikosulut aiheuttavat suuria mekaanisia sekä termisiä rasituksia sähköasemalla. Rinnakkaisissa johtimissa kulkevien oikosulkuvirtojen synnyttämät magneettikentät aiheuttavat niiden välille voimavaikutuksia, jotka rasittavat ko. johtimien lisäksi myös

niihin kytkettyjä laitteita ja tukirakenteita. Oikosulkuvirta aiheuttaa myös oikosulkupiiriin kytkettyjen laitteiden ja johtimien voimakasta lämpenemistä. Suurin oletettu oikosulkuvirta, niin dynaaminen kuin terminenkin, onkin yksi tärkeimmistä kriteereistä sähköaseman laitteiden valinnassa sekä niiden tukirakenteiden mitoituksessa. Alati lisääntyvästä sähköntarpeesta johtuva sähköverkkojen vahvistaminen kasvattaa oikosulkuvirtoja, mikä entisestään lisää tämän mitoituskriteerin merkitystä tulevaisuudessa.

Kovat tuulet, sateet ja lämpötilavaihtelut aiheuttavat rasituksia ennen kaikkea laitteiden tukirakenteille ja näiden vaikutukset tulee ottaa huomioon lumi-, tuuli- ja jääkuormia laskettaessa. Tämänkin merkitys tulee lisääntymään tulevaisuudessa ilmaston lämmitessä, koska sen odotetaan lisäävän ja voimistavan erilaisia poikkeuksellisia sääilmiöitä.

Poikkeustilanteisiin voidaan laskea myös ukkonen. Ukkoseen liittyvä salama sähköjärjestelmään tai sen ympäristöön iskiessään aiheuttaa järjestelmään jyrkkäreunaisen jännitepiikin, jonka seurauksena voi olla läpilyönti ko. järjestelmään kytketyn laitteen eristyksessä. Tällainen läpilyönti saattaa rikkoa laitteen ja aiheuttaa vian laajenemisen. Ukkonen onkin erittäin merkittävä vikojen aiheuttaja sähköasemilla ja sen vaikutukset on otettava huomioon laitteiden valinnassa ja suojauksessa.

Jotta näitä ilmiöitä voitaisiin käsitellä ja niiden vaikutuksia arvioida laskelmien avulla, ne on jouduttu mallintamaan matemaattisten kaavojen avulla. Tähän työhön on tarvittu runsaasti sekä teoreettista osaamista että kentältä hankittua mittaustietoa. Koska nämä ilmiöt ovat luonteeltaan hyvin dynaamisia ja käyttäytyvät lisäksi epälineaarisesti, on malleja jouduttu yleensä vielä yksinkertaistamaan muuttamalla ne staattiseen ja lineaariseen muotoon likimääräistysten sekä erilaisten dynaamisten kertoimien avulla.

## Tutkimuksen aineisto ja menetelmät

Lähinnä SFS:n ja IEC:n standardien sekä CIGRÉ:n julkaisujen avulla on selvitetty, mitä mitoituslaskelmia sähköaseman ensiöpuolen suunnittelussa tarvitaan sekä mitkä ovat näihin laskelmiin liittyvät teoreettiset taustat.

Tutkimusta varten on käyty läpi muutama ABB Oy Sähköasemat -yksikön tekemä sähköasemaprojekti ja selvitetty, mitä ensiöpuolen suunnitteluun liittyviä laskelmia niissä on tehty, miksi ne on tehty ja mitä menetelmiä niissä on käytetty. Myös projekteihin liittyvistä teknisistä spesifikaatioista on kerätty tietoa asiakkaiden vaatimuksista näiden laskelmien suhteen.

ABB Oy Sähköasemat -yksikön työntekijöitä haastatteleamalla on kerätty tietoa nykyisin käytössä olevista laskentamenetelmistä ja toiveista näiden parantamiseksi.

Lisäksi on selvitetty, mitä uusia laskentamenetelmiä vielä tarvittaisiin. Tutkimuksessa on pyritty keräämään tietoa myös muilta sähköasemamarkkinoilla toimivilta yrityksiltä.

Internetin ja kyselyiden avulla on selvitetty, mitä valmiita laskentaohjelmia markkinoilta löytyy ja pyritty arvioimaan niiden soveltuvuutta sähköasemasuunnitteluun.

### **Tutkimuksen raportointi**

Tutkimuksen raportointi jakaantuu karkeasti ottaen kolmeen osaan: teoreettiseen, käytännölliseen ja soveltavaan osaan. Teoreettisessa osassa selvitetään ensin laskelmien tarpeellisuus ja taustat, sitten käytännön osassa niiden nykyinen toteutus ja viimeksi soveltavassa osuudessa esitetään kokonaan uuden laskentaohjelman suunnittelu.

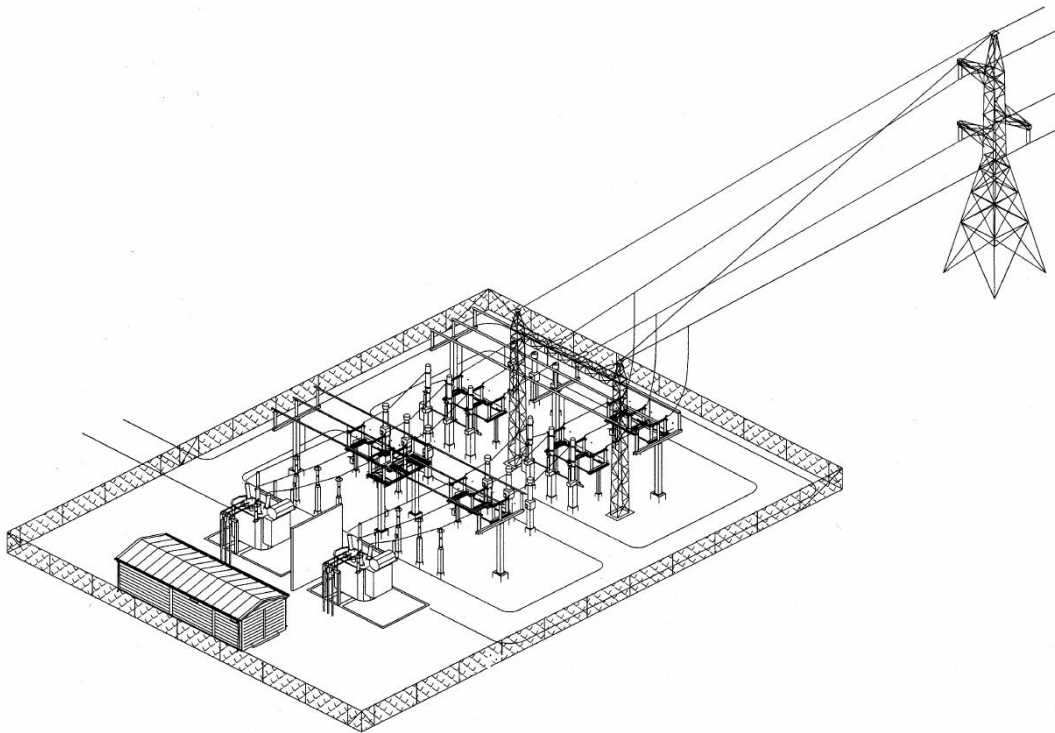
Tutkimuksen tuloksena on saatu kokonaisvaltainen kuva sähköaseman ensiöpuolen suunnittelussa tarvittavista mitoituslaskelmista ja niiden perusteista. Tutkimus antaa samalla pohjan niin uusien laskentamenetelmien kehittämiseksi kuin vanhojen parantamisellekin.

Tutkimuksen käytännön sovellutuksena on tehty Exceliin perustuva ohjelma oikosulkuun liittyvien mekaanisten ja termisten vaikutusten laskentaa varten.

## 2 Teoreettinen tausta

### 2.1 Yleistä

Sähköasemalla tarkoitetaan sellaista sähköenergian siirto- tai jakeluverkon kohtaa, jossa voidaan suorittaa kytkentöjä, jännitteen muuntamista tai sähköenergian siirron keskittämistä tai jakoa eri johdoille [1]. Sähköasemasta käytetään usein muitakin nimityksiä, kuten esim. kytkinasema, kytkinlaitos, syöttöasema ja muuntoasema, sen käyttötarkoituksesta riipuen. Mikäli sähköaseman ensiöpuoli on asennettu ulos, voidaan vielä joihinkin nimityksiin lisätä ulko-etuliite, esim. ulkokytkinlaitos. Näissä ulkokytkinlaitoksissa käytetään virtajohtimina etupäässä paljaita kiskoja ja köysiä, jotka eristetään toisistaan ja maahan johtavista rakenteista eristimien ja riittävän ilmavälin avulla. Tällöin voidaan puhua ns. ilmaeristeisestä ulkokytkinlaitoksesta. Esimerkki tällaisesta ulkokytkinlaitoksesta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1: Kahden muuntajan ulkokytkinlaitos johdon päässä. [2]

Tässä työssä tullaan tutkimaan juuri tämän tyyppistä ilmaeristeistä ulkokytkinlaitosta, mutta siitä tullaan kuitenkin jatkossa käyttämään yleisnimitystä sähköasema yksinkertaisuuden vuoksi.

Tällaisen sähköaseman ensiöpuoli koostuu karkeasti ottaen kokoojakiskosta tai -kiskoista, siihen liitetyistä kentistä, aseman ukkossuojauksesta ja maadoituksista. Kokoojakiskot voivat olla joko putki- tai köysikiskoja ja ne varustetaan yleensä mit-

tamuuntajilla ja maadoituserottimilla. Kentät koostuvat puolestaan kytkentälaitteista (katkaisijat, erottimet, maadoituserottimet), mittamuuntajista, ylijännitesuojista sekä näiden välisistä liitynnöistä. Kenttään voi lisäksi kuulua, sen käyttötarcoituksesta riippuen, esim. muuntaja, kondensaattori, reaktori, jne. Lisäksi sähköaseman ensiöpuolen laitteiden, kuten avojohtojen ja muuntajien, liityntöjä varten voidaan tarvita ns. portaaleja. Avojohtojen tapauksessa puhutaan tällöin pääteportaalista.

Seuraavassa lähdetään käsittelemään edellä määritellyn sähköaseman suunnitteluun ja rakentamiseen liittyviä teknisiä vaatimuksia.

## 2.2 Vaatimukset

Sähköenergian siirroilta ja jakelulta vaaditaan ennen kaikkea turvallisuutta ja luotettavuutta, mielellään vielä kohtuuhintaan. Suomessa turvallisuusvaatimukset on määritellyt Kauppa- ja teollisuusministeriö päätöksessään 1193/1999 [3]. Sen mukaan vaatimukset katsotaan täyttyvän, jos suunnittelussa ja rakentamisessa noudatetaan kaikilta osin standardeja, jotka Turvatekniikan keskus TUKES on vahvistanut ohjeessaan S10. Tämän ohjeen mukaan keskeisin sähköaseman suunnittelua ja rakentamista koskeva standardi Suomessa on SFS 6001, suurjänniteasennukset [4]. Vaikka SFS 6001 onkin suomalainen standardi, soveltuu se pitkälle myös vientitoimituksissa, koska sen taustalla ovat kansainväliset IEC, EN ja HD -standardit. SFS 6001 standardin perustana on eurooppalainen HD 637 -harmonisointidokumentti [5].

Turvallisuuteen ja luotettavuuteen liittyy olennaisena osana kestävyys. SFS 6001 standardi vaatii, että asennusten ja laitteiden on kestävä ennakoitavissa olevat paikalliset sähköiset, mekaaniset, ilmastolliset ja ympäristövaikutukset. Asennukset ja laitteet eivät myöskään saa aiheuttaa kohtuutonta häiriötä ympäristöön.

Seuraavassa nämä SFS 6001 standardin mukaiset vaatimukset on lueteltu ensiöpuolen suunnittelun näkökulmasta katsottuina ja jaoteltuina kolmeen eri kategoriaan niiden vaikutusalueiden mukaan.

### A. Sähköiset vaatimukset:

- Järjestelmien tähtipisteen maadoitustapana on käytettävä jotakin SFS 6001 standardin mukaista menetelmää.
- Asennusten ja laitteiden on kestävä mitoitusjännite sekä käyttötaajuiset ylijännitteet, kytkentäylijännitteet ja ilmastolliset ylijännitteet.
- Järjestelmä on suunniteltava ja rakennettava siten, että virrat normaaleissa käyttöolosuhteissa eivät ylitä laitteiden mitoitusvirtoja tai komponenttien sallittuja virtoja, jos mitoitusvirtoja ei ole määritelty.

- Asennukset on suunniteltava, rakennettava ja koottava kestävästi turvallisesti oikosulkuvirtojen mekaaniset ja termiset rasitukset. Oikosulun standardin mukainen kesto aika on 1,0 s.
- Asennukset on suojattava automaattisesti toimivilla laitteilla, jotka kytkevät pois vaiheiden väliset oikosulut. Maasuluissa voi riittää pelkkä ilmaisu tähtipisteen maadoitustavasta riippuen.
- Asennukset on suunniteltava järjestelmän mitoitusajalle.
- Asennukset on suunniteltava siten, että koronan aiheuttamat radiohäiriöt eivät ylitä määriteltyä tasoa.
- Maadoitusjärjestelmän tulee toimia kaikissa olosuhteissa ja varmistaa ihmisten turvallisuus paikoissa, joissa henkilöillä on oikeus kulkea.
- Asennukset on suojattava suorilta salamaniskuilta.

## **B. Mekaaniset vaatimukset:**

- Asennusten, laitteiden, rakenteiden ja perustusten on kestävä seuraavat normaalit kuormitustapaukset:
  - + oman painon aiheuttama kuormitus
  - + ilmajohdon aiheuttama vetokuormitus (mukaan luettuna jääkuorma ja tuulikuorma) laskettuna suurimasta johtimen jännityksestä epäsuotuisimmissa paikallisissa olosuhteissa
  - + asennuskuormitus, joka on vähintään 1,0 kN suuruinen tukirakenteen, kiristysportaalien jne. kriittisimmässä kohdassa
  - + muitten kuin ilmajohdojen eli taipuisien liitosjohtimien sekä jäykkien kiskojen jääkuorma
  - + muitten kuin ilmajohdojen eli taipuisien liitosjohtimien sekä jäykkien kiskojen tuulikuorma.
- Asennusten, laitteiden, rakenteiden ja perustusten on kestävä oman painon aiheuttaman kuormituksen ja vetokuormituksen kanssa samanaikaisesti suurin seuraavista poikkeuksellisista kuormitustapauksista:
  - + kytkentävoimat
  - + oikosulkuvoimat
  - + johtimen tai kiristysketjun katkeamiset.
- Edellisten lisäksi on tuulen, sähkömagneettisten rasitusten ja liikenteen (esimerkiksi hetkellinen tie- ja rautatieliikenne) aiheuttama värähtely otettava huomioon. Valmistajan on ilmoitettava laitteen kestävyys värähtelyrasituksia vastaan.



### C. Ilmasto- ja ympäristövaikutuksia koskevat vaatimukset sekä erityisvaatimukset:

- Asennukset, johon sisältyy kaikkien laitteiden ja apulaitteiden muodostama kokonaisuus, on suunniteltava siten, että ne kestävät asennuspaikan lämpötilaa, korkeutta, ilmanpainetta, kosteutta, sademäärää, likaisuutta ja auringonsäteilyä.
- Pienten eläinten ja mikro-organismien aiheuttama vaara on suunnittelu- ja rakennusvaiheessa torjuttava esim. sopivilla materiaalivalinnoilla, pääsyn estämisellä sekä sopivalla lämmityksellä ja tuuletuksella.
- Asennukset on suunniteltava ja rakennettava siten, että melutaso ei ylitä viranomaisten antamia raja-arvoja.
- Maanjäristysten vaikutukset on otettava huomioon seismisillä alueilla laitteiden valinnassa ja asennusten suunnittelussa. (Suomessa ei tällaisia alueita esiinny.)

Nämä em. vaatimukset toimivat siis perustana sähköaseman suunnittelulle ja rakentamiselle. Ne ovat sen vuoksi hyvä lähtökohta myös tätä tutkimusta ajatellen.

Sähköaseman tilaaja määrittelee yleensä kestävyyyteen liittyvät sähköiset perusvaatimukset, kuten maadoitustavan, nimellisarvot, ylijännitekestoisuudet ja oikosulkuvirtakestoisuudet. Lisäksi tilaajalla voi olla standardista poikkeavia vaatimuksia esim. ilmastollisten ja ympäristövaikutusten suhteen.

Kun sähköaseman toimittaja hankkii sähköaseman laitteet, kuten katkaisijat, erotimet, mittamuuntajat, jne., on yleensä suunnittelun tehtävänä varmistaa, että ne täyttävät nämä tilaajan määrittelemät perusvaatimukset. Laitteiden toimittajat ja viime kädessä niiden valmistajat puolestaan vastaavat omien tuotteidensa standardien ja vaatimusten mukaisuudesta. Sähköaseman toimittajan vastuulla on se, että näistä laitteista rakennettu sähköasema kokonaisuudessaan täyttää tilaajan ja standardien mukaiset vaatimukset. Tämän varmistamiseksi tarvitaan suunnitteluvaiheessa laskelmia, jotka liittyvät mm. kokoojakiskojen, tukieristimien, tukirakenteiden ja perustusten mitoittamiseen.

Kun näitä standardin esittämiä vaatimuksia tarkastellaan laskelmien näkökulmasta, huomataan että oikosulkuvirtoihin liittyvät vaatimukset esiintyvät niin sähköisten kuin mekaanistenkin vaatimusten puolella. Sähköisissä vaatimuksissa ovat lisäksi salamaniskulta suojautuminen, koronahäiriöt ja maadoitusjärjestelmän toimivuus sellaisia asioita, jotka edellyttävät jonkinlaisten laskelmien tai tarkastelujen suorittamista. Mekaanisissa vaatimuksissa ovat oikosulkulaskelmien lisäksi kaikki muutkin standardissa mainitut kohdat sellaisia, jotka tulee ottaa laskelmissa huomioon. Muiden vaatimusten osalta (kategoria C) melutaso ja maanjäristyksen vaikutukset

kuuluvat näihin laskelmia edellyttäviin asioihin. Seuraavassa lähdetään käymään tarkemmin läpi näihin laskelmiin liittyviä teoreettisia taustoja.

## 2.3 Oikosulkulaskelmat

Oikosululla tarkoitetaan sähköjärjestelmän vikaa, jossa vähintään kaksi potentiaalista erisuuruista tai -vaiheista sähköä johtavaa materiaalia ovat pienen impedanssin kautta yhteydessä toisiinsa. Kolmivaihejärjestelmässä oikosulku voi olla joko symmetrinen tai epäsymmetrinen: symmetrinen siinä tapauksessa, että se käsittää kaikki kolme vaihetta ja muussa tapauksessa epäsymmetrinen. Oikosulkuvirta ylittää yleensä moninkertaisesti normaalin käyttövirran, minkä vuoksi se aiheuttaa suuria sähkömagneettisia voimavaikutuksia sekä lämpövaikutuksia. Laitteiden ja asennusten kykyä kestää näitä mekaanisia ja termisiä rasituksia arvioidaan niiden dynaamisen kestovirran  $I_{\text{dyn}}$  ja termisen kestovirran  $I_{\text{thr}}$  perusteella.

### 2.3.1 Oikosulkuvirta

Oikosulkuvirran suuruus riippuu monesta eri tekijästä, kuten vikatapauksesta, oikosulkupiirin jännitteestä, oikosulkupiirin impedanssista, oikosulun syntyhetkestä ja sen kestoajasta. Oikosulkuvirran suuruus voidaan laskea IEC 60909 -standardin [6] mukaisesti.

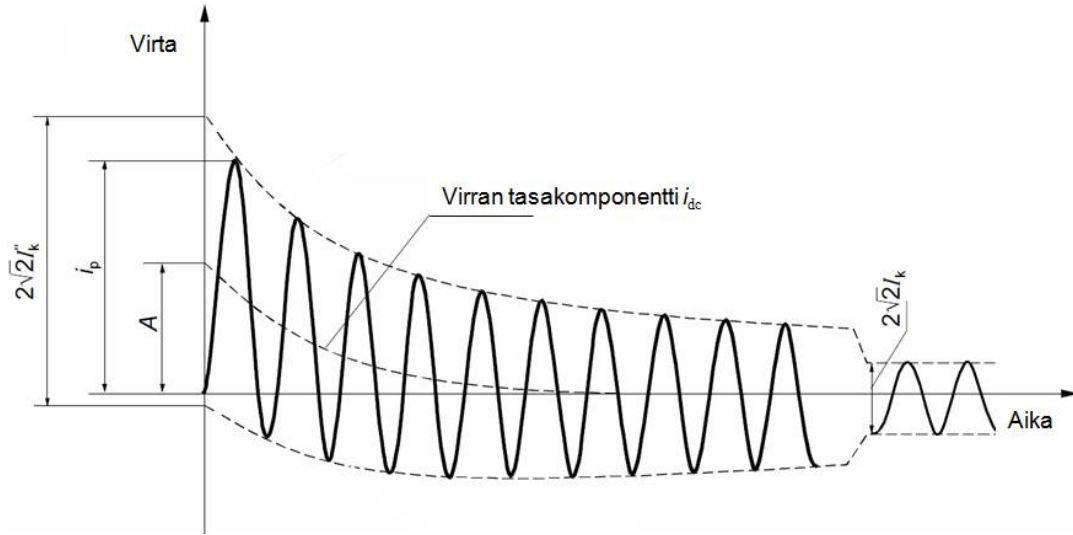
Oikosulkuvirran yhteydessä puhutaan myös sen symmetrisyydestä. Tätä ei pidä kuitenkaan sekoittaa edellä käsiteltyyn vian symmetrisyyteen. Symmetrisellä oikosulkuvirralla tarkoitetaan vikavirtaa, jossa ei ole tasakomponenttia. Se on siis aika-akselin suhteen symmetrinen. Vastaavasti epäsymmetrisessä oikosulkuvirrassa tasakomponentti on mukana.

Kolmivaiheisessa viassa oikosulkuvirran hetkellisarvo ajan funktiona voidaan esittää kaavan muodossa:

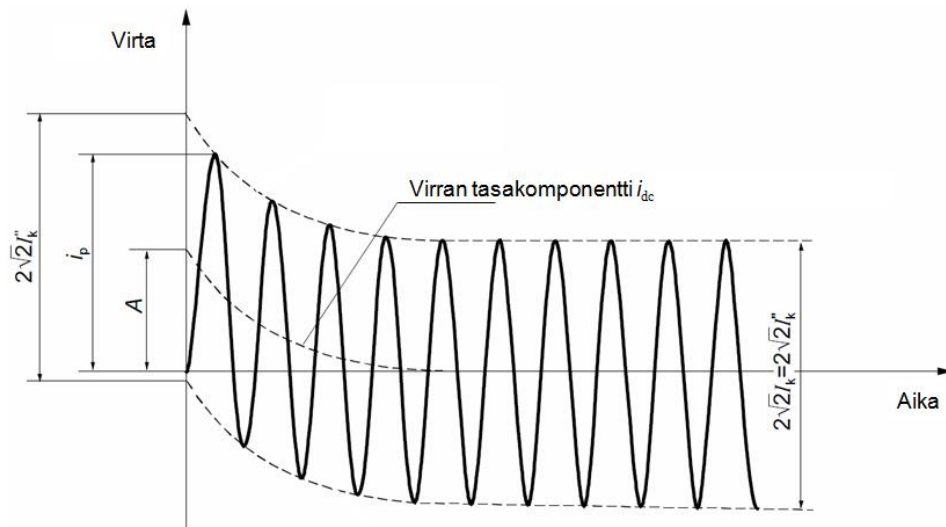
$$i(t) = \sqrt{2} \left[ I_b(t) \sin(\omega t + \varphi_u - \gamma_z) + I_k'' \sin(\gamma_z - \varphi_u) e^{-t/\tau} \right] \quad (1)$$

jossa  $I_b(t)$  on ajan mukana vaimeneva symmetrisen oikosulkuvirran katkaisuvirta (tehoarvo),  $I_k''$  on alkuoikosulkuvirta,  $\omega$  on kulmataajuus,  $t$  on aika oikosulun alkuhetkestä,  $\varphi_u$  on jännitteen vaihekulma oikosulun alkuhetkellä,  $\gamma_z$  on oikosulkupiirin impedanssin vaihekulma ja  $\tau$  on oikosulkupiirin aikavakio. Yhtälön oikean puolen ensimmäinen termi edustaa oikosulkuvirran vaihtokomponenttia ja toinen termi sen tasakomponenttia.  $I_b(t)$  lasketaan IEC 60909 standardin, luvun 4.5.2.1, mukaisesti ja se riippuu ajan lisäksi vikavirran suuruudesta suhteessa generaattorin nimellisvirtaan. [7]

Kuvassa 2 on esitetty kaavan (1) mukainen oikosulkuvirran käyrämuoto, kun vika tapahtuu lähellä generaattoria ja jännitteen nollakohdassa. Vian ollessa kaukana generaattoreista, kuten se sähköasemilta katsottuna yleensä onkin, voidaan oikosulkuvirran vaihtokomponentin vaimeneminen jättää huomioimatta. Tällöin kaavassa (1)  $I_b(t) = I_k''$  ja oikosulkuvirran käyrämuoto muuttuu kuvan 3 mukaiseksi.



Kuva 2: Oikosulkuvirran käyrämuoto lähellä generaattoria tapahtuvassa viassa.  $I_k''$  on alkuoikosulkuvirta,  $I_k$  on jatkuvan tilan oikosulkuvirta,  $i_p$  on sysäysoikosulkuvirta ja  $A$  on oikosulkuvirran tasakomponentin  $i_{dc}$  huippuarvo. [6]



Kuva 3: Oikosulkuvirran käyrämuoto kaukana generaattorista tapahtuvassa viassa.  $I_k''$  on alkuoikosulkuvirta,  $I_k$  on jatkuvan tilan oikosulkuvirta,  $i_p$  on sysäysoikosulkuvirta ja  $A$  on oikosulkuvirran tasakomponentin  $i_{dc}$  huippuarvo. [6]

Kuvissa 2 ja 3 oikosulkuvirta saavuttaa huippuarvonsa puolen jakson kuluttua vian syntyhetkestä. Tämä suurin mahdollinen oikosulkuvirran huippuarvo eli ns. sysäys-oikosulkuvirta saadaan yhtälöstä:

$$i_p = \kappa \sqrt{2I_k''} \quad (2)$$

jossa  $\kappa$  on oikosulkuvirran sysäyskerroin. Se ottaa huomioon oikosulkuvirran tasakomponentin vaikutuksen sysäys-oikosulkuvirran suuruuteen ja se saadaan yhtälöstä:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (3)$$

jossa  $R$  on oikosulkupiirin resistanssi ja  $X$  oikosulkupiirin reaktanssi. Sysäyskerroimen teoreettinen maksimi on 2 (kun  $X$  lähestyy ääretöntä), mutta kokemusten mukaan se harvoin ylittää arvoa 1,8 suurjänniteverkoissa [8].

Jotta laitteet ja asennukset kestäisivät nämä oikosulkuvirran aiheuttamat mekaaniset rasitukset, on niiden dynaamisen kesto- $I_{\text{dyn}}$  oltava suurempi tai yhtä suuri kuin suurin mahdollinen sysäys-oikosulkuvirta  $i_p$ . Toisin sanoen seuraavan epäyhtälön täytyy olla voimassa:

$$I_{\text{dyn}} \geq i_p \quad (4)$$

Ekvivalenttisella termisellä oikosulkuvirralla  $I_{\text{th}}$  tarkoitetaan oikosulkuvirran tehollisarvoa, jolla on sama terminen vaikutus ja kesto-aika kuin todellisella oikosulkuvirralla, jolla voi olla ajan mukana vaimeneva tasa- ja vaihtokomponentti [6]. Tämä voidaan esittää kaavan muodossa seuraavasti:

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k''^2 (m + n) T_k = I_{\text{th}}^2 T_k \quad (5)$$

jossa  $i$  on oikosulkuvirran hetkellisarvo,  $I_{\text{th}}$  on ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta,  $T_k$  on oikosulkuvirran kesto-aika,  $m$  on oikosulkuvirran tasakomponentin ja  $n$  vaihtokomponentin lämpövaikutuksen huomioiva kerroin. Tästä kaavasta saadaan ratkaistuna:

$$I_{\text{th}} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (6)$$

Jos oikosulku tapahtuu kaukana generaattoreista, kuten kuvassa 3, ja vian kesto-aika ylittää 0,5 s, voidaan laskelmissa olettaa, että  $m + n = 1$ , jolloin  $I_{\text{th}} = I_k''$  [6].

Jotta laitteet ja asennukset kestäisivät oikosulkuvirran termiset vaikutukset, on niiden nimellisen termisen oikosulkuvirtakestoisuuden oltava suurempi tai yhtä suuri

kuin edellä laskettu ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta. Toisin sanoen seuraavan epäyhtälön on oltava voimassa:

$$I_{\text{thr}} \geq I_{\text{th}} \sqrt{\frac{T_{\text{k}}}{T_{\text{kr}}}} \quad (7)$$

jossa  $I_{\text{thr}}$  on laitteen nimellinen terminen oikosulkukestoisuus ja  $T_{\text{kr}}$  on tätä vastaava nimellinen kesto aika. Yleensä tämä nimellinen kesto aika on 1,0 s IEC-standardeissa [9].

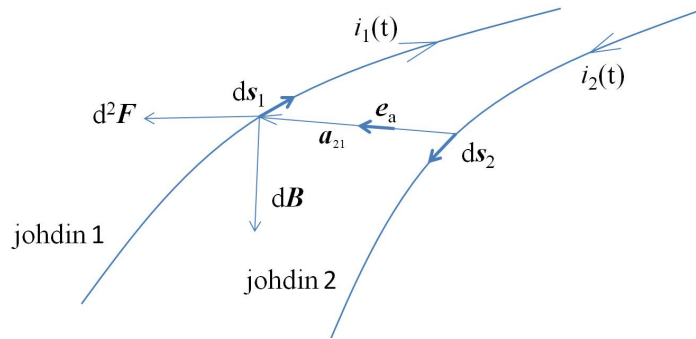
Arvot  $I_{\text{thr}}$  ja  $I_{\text{dyn}}$  sitoo standardeissa toisiinsa yhtälö [1]:

$$I_{\text{dyn}} = 2,5 I_{\text{thr}} \approx 1,8 \sqrt{2} I_{\text{thr}} \quad (8)$$

Termiseen kestoisuuteen palataan vielä luvussa 2.3.4, jossa käsitellään oikosulun termisiä vaikutuksia laajemmin.

### 2.3.2 Oikosulkuvoimat

Biot´n ja Savartin lain mukaan virtajohdin synnyttää ympärilleen magneettivuon, jonka tiheys riippuu virran suuruudesta, etäisyydestä tähän johtimeen sekä johtimen ympärillä olevasta väliaineesta. Kuvassa 4 johtimessa 2 kulkema virta synnyttää magneettivuon johtimen 1 kohdalle.



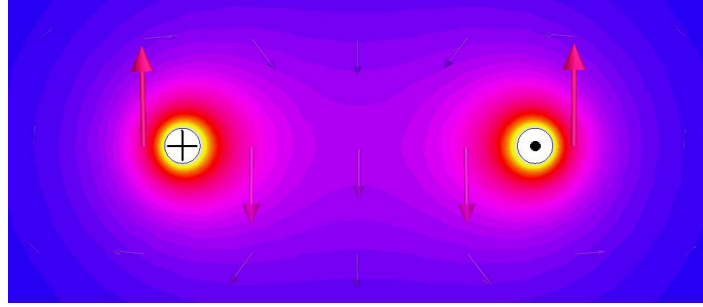
Kuva 4: Johtimessa 2 kulkevan virran voimavaikutus johtimeen 1.  $\mathbf{F}$  on johtimeen 1 kohdistuva voima,  $\mathbf{B}$  on johtimen 2 aiheuttama magneettivuon tiheys johtimen 1 kohdalla,  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti,  $i_1(t)$  ja  $i_2(t)$  ovat johtimien virtojen hetkelisarvot,  $\mathbf{a}_{21}$  on etäisyysvektori johtimesta 2 johtimeen 1,  $\mathbf{e}_a$  on tämän etäisyysvektorin suuntainen yksikkövektori,  $d\mathbf{s}_1$  ja  $d\mathbf{s}_2$  ovat johtimien suuntaisia pituusalkioita.

Tämän magneettivuon differentiaalin tiheys pituusalkion  $d\mathbf{s}_1$  kohdalla saadaan

yhtälöstä:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_2(t) \frac{d\mathbf{s}_2 \times \mathbf{e}_a}{a_{21}^2} \quad (9)$$

jossa  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti. Sitten kun näiden molempien johtimien aiheuttamat magneettivuot otetaan huomioon, saadaan magneettivuon tiheydelle kuvan 5 mukainen esitys.



Kuva 5: Kahden virrallisen johtimen muodostama magneettikenttä kuvan 4 mukaisessa tapauksessa. Kuva on tehty Ansoft Maxwell -ohjelman avulla.

Lorenzin lain avulla saadaan puolestaan laskettua differentiaalin voima, joka kohdistuu tähän pituusalkioon  $d\mathbf{s}_1$ :

$$d\mathbf{F} = i_1(t) d\mathbf{s}_1 \times \mathbf{B} \quad (10)$$

Kun tämä lauseke derivoidaan  $\mathbf{B}$ :n suhteen ja sijoitetaan siihen edellinen lauseke, ottamalla lisäksi huomioon, että yksikkövektori  $\mathbf{e}_a = \mathbf{a}_{21}/a_{21}$ , saadaan voimalle toisen asteen osittaisdifferentiaaliyhtälö:

$$\partial^2 \mathbf{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1(t) i_2(t) \frac{\partial \mathbf{s}_1 (\partial \mathbf{s}_2 \times \mathbf{a}_{21})}{a_{21}^3} \quad (11)$$

Johtimessa 2 kulkeva virta aiheutti siis voimavaikutuksen johtimeen 1 siinä kulkevan virran vaikutuksesta. Aivan samalla tavalla johdin 1 aiheuttaa voimavaikutuksen johtimeen 2. Nämä johtimiin kohdistuvat voimat ovat aina yhtä suuria mutta vastakkaismerkkisiä. Jos virrat kulkevat samaan suuntaan, niin voimat pyrkivät vetämään johtimia toisiansa kohti ja jos virrat kulkevat eri suuntiin, niin voimat pyrkivät työntämään ne kauemmaksi toisistaan.

Jos johtimet 1 ja 2 ovat poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoisia, suoria, yhtä pitkiä ja kulkevat koko pituudeltaan samalla etäisyydellä toisistaan, saadaan edellä olevista lausekkeista integroimalla voiman itseisarvoksi:

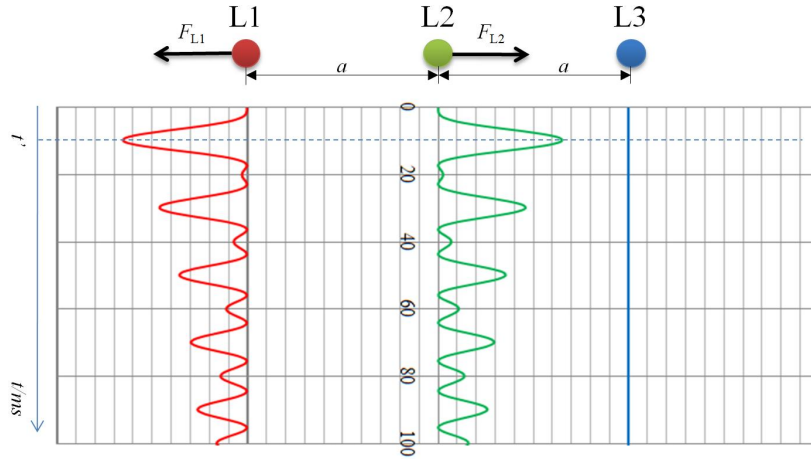
$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1(t) i_2(t) \frac{l}{a} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right] \quad (12)$$

jossa  $a$  on johtimien keskilinjoiden välinen etäisyys ja  $l$  on johtimien pituus. Jos vielä oletetaan, että  $a \ll l$ , sievenee kaava vielä yksinkertaisempaan muotoon:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1(t) i_2(t) \frac{l}{a} \quad (13)$$

Tämä on nyt se peruskaava, jota IEC 60865 -standardi [9] käyttää sähkömagneettisten voimavaikutusten laskentaan. Kaava antaa jonkin verran todellista suuremman arvon, mikä mitoituksen kannalta on kuitenkin turvallisemmalla puolella. Mitä pienempi suhde  $a/l$  on, sitä tarkempi on tulos. Esimerkiksi jos  $a/l \leq 0,1$ , niin virhe on silloin  $< 10 \%$ .

Tämän kaavan avulla voidaan seuraavassa laskea 3-vaiheisen vaihtosähköjärjestelmän kokoojakiskoihin kohdistuvia voimia eri vikatilanteissa edellyttäen tietenkin, että kiskot ovat samassa tasossa. Tarkastellaan ensin vaiheiden L1 ja L2 välistä oikosulkua. Kun kaavaan (13) sijoitetaan kaavan (1) mukaiset vaihevirrrat ottamalla huomioon, että vaihe-vaihe -viassa ne ovat yhtä suuret mutta vastakkaismerkkiset, saadaan voimille kuvan 6 mukaiset kuvaajat. Laskelmissa on oletettu, että oikosulku tapahtuu kaukana generaattorista ( $I_b(t) = I''_k$ ) ja jännitteen nolla-hetkellä ( $\varphi_u = 0$ ), mikä on voimien kannalta pahin tilanne. Kuvasta 6 nähdään, että voimat  $F_{L1}$  ja  $F_{L2}$  ovat joka hetki yhtä suuria mutta suunnaltaan vastakkaisia. Voiman maksimiarvo saavutetaan kuvan mukaisesti puolen jakson jälkeen vian syntyhetkestä.



Kuva 6: Kiskoihin vaikuttavat voimat vaiheiden L1 ja L2 välisessä oikosulussa ajan funktiona.  $F_{L1}$  on vaiheeseen L1 kohdistuva voima,  $F_{L2}$  on vaiheeseen L2 kohdistuva voima,  $a$  on kiskojen keskilinjoiden välinen etäisyys ja  $t'$  on voiman maksimiajankohda. Kuva on tehty Excel-ohjelman avulla.

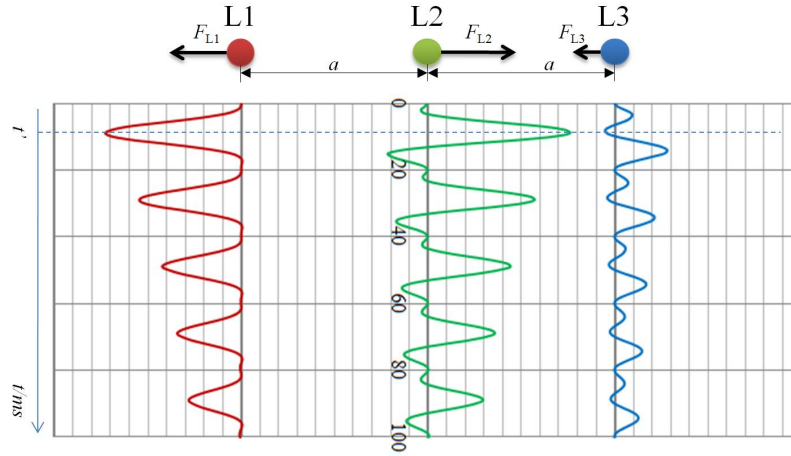
Aivan samalla periaatteella voidaan laskea voimat symmetrisessä, 3-vaiheisessa oikosulussa. Tässä on kuitenkin muistettava ottaa kaikkien vaiheiden keskinäiset voimavaikutukset huomioon seuraavien kaavojen mukaisesti:

$$F_{L1}(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ i_{L1}(t)i_{L2}(t) + \frac{i_{L1}(t)i_{L3}(t)}{2} \right] \frac{l}{a} \quad (14)$$

$$F_{L2}(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} [i_{L2}(t)i_{L3}(t) - i_{L1}(t)i_{L2}(t)] \frac{l}{a} \quad (15)$$

$$F_{L3}(t) = -\frac{\mu_0}{2\pi} \left[ i_{L2}(t)i_{L3}(t) + \frac{i_{L1}(t)i_{L3}(t)}{2} \right] \frac{l}{a} \quad (16)$$

Näiden kaavojen avulla saadaan voimille kuvan 7 mukainen käyrästö.



Kuva 7: Kiskoihin symmetrisessä oikosulussa vaikuttavat voimat ajan funktiona.  $F_{L1}$  on vaiheeseen L1 kohdistuva voima,  $F_{L2}$  on vaiheeseen L2 kohdistuva voima,  $F_{L3}$  on vaiheeseen L3 kohdistuva voima,  $a$  on kiskojen keskilinjojen välinen etäisyys ja  $t'$  on voiman maksimiajankohta. Kuva on tehty Excel-ohjelman avulla.

Kuvassa 7 on oletettu, että oikosulku tapahtuu kaukana generaattorista ( $I_b(t) = I_k''$ ) ja syntyy hetkellä, kun vaiheen L1 jännite on nolla ( $\varphi_{uL1} = 0$ ). Tämä ei kuitenkaan ole voimien kannalta se pahin tilanne, minkä voi todeta maksimivoimia esittävästä käyrästöstä kuvassa 8. Näistä käyristä nähdään, että pahimmassa tilanteessa suurin voima kohdistuu keskimmäiseen vaiheeseen ja silloin, kun  $\varphi_{uL1} \approx 75^\circ \pm n90^\circ$ , jossa  $n = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Tässäkin tapauksessa on selvää, että kaikkien voimien summan on joka hetkellä oltava nolla, minkä voi myös todeta kuvasta 7.

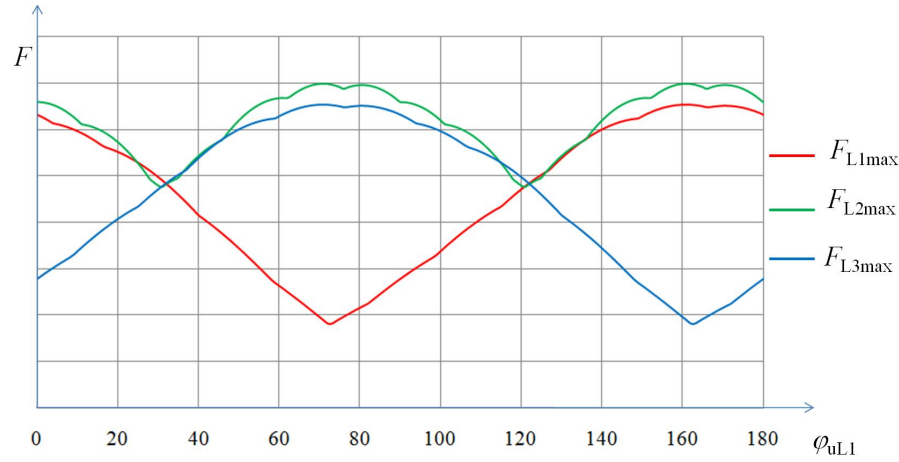
Ratkaisemalla kaksi- ja kolmivaiheisissa oikosuluissa vaiheisiin kohdistuvien voimien lausekkeet (13)–(16) voidaan voimille muodostaa yleinen komponenttimuodossa oleva esitys, josta on myöhemmin hyötyä arvioitaessa oikosulun aiheuttamia mekaanisia vaikutuksia luvussa 2.3.3:

$$F(t) = \underbrace{F_0 + F_{2\omega}(t)}_{\text{jatkuva}} + \underbrace{F_g(t) + F_\omega(t)}_{\text{vaimeneva}} \quad (17)$$



jossa  $F_0$  on vakiovoima (voiman  $F(t)$  jatkuvan tilan aritmeettinen keskiarvo),  $F_{2\omega}$  on toisen harmonisen taajuudella värähtelevä, vaimenematon voima,  $F_g$  on eksponentiaalisesti, aikavakiolla  $\tau/2$  vaimeneva voima ja  $F_\omega$  on verkon taajuudella värähtelevä, aikavakiolla  $\tau$  vaimeneva voima. [7]

Kolmivaiheisessa oikosulussa keskimmäisen vaiheen L2 vakiovoiman komponentti  $F_0$  on nolla, mikä tarkoittaa sitä, että jatkuvassa tilassa kokonaisvoiman  $F(t)$  aritmeettinen keskiarvokin on nolla. Uloimmaisissa vaiheissa L1 ja L3 näin ei ole, eikä myöskään kaksivaiheisen oikosulun aikana viallisissa vaiheissa. Kuvista 6 ja 7 voidaan myös todeta, että kolmivaiheisessa oikosulussa vaiheen L1 voiman kuvaaja on muodoltaan lähes samanlainen verrattuna voimien kuvaajiin kaksivaiheisessa oikosulussa.



Kuva 8: Kiskoihin symmetrisessä oikosulussa vaikuttavien voimien maksimit kulman  $\varphi_{uL1}$  funktiona.  $\varphi_{uL1}$  on vaiheen L1 jännitteen kulma oikosulun syntyhetkellä,  $F_{L1max}$  on vaiheeseen L1,  $F_{L2max}$  on vaiheeseen L2 ja  $F_{L3max}$  on vaiheeseen L3 kohdistuva maksimi voima. Kuva on tehty Excel-ohjelman avulla.

IEC 60865 -standardin [9] mukaan voidaan tämä kuvassa 8 kolmivaiheisessa oikosulussa esiintyvä suurin voima  $F_{L2max}$  laskea riittävän tarkasti kaavalla:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} \quad (18)$$

jossa  $i_{p3}$  on 3-vaiheisen oikosulkuvirran huippuarvo,  $l$  on kiskon tukieristinten keskikilnjojen välinen etäisyys ja  $a_m$  on kiskojen välinen tehollinen etäisyys.  $a_m = a$  yksittäiselle, poikkileikkaukseltaan pyöreille kiskoille; muussa tapauksessa se täytyy määritellä IEC 60865 standardissa esitetyn käyrästä avulla. Kaavaa voidaan käyttää myös kolmioon asennetuille johtimille, jossa  $a_m$  on silloin kolmion sivun pituus. Kaava antaa hieman todellista suurempia arvoja, oikosulkuvirran aikavakiosta, ym. tekijöistä riippuen, mutta tämä on mitoituksen kannalta kuitenkin turvallisemmalla puolella.

Vastaavasti kaksivaiheisessa oikosulussa voidaan viallisiin vaiheisiin kohdistuva maksimivoima laskea kaavalla:

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \frac{l}{a_m} \quad (19)$$

jossa  $i_{p2}$  on 2-vaiheisen oikosulkuvirran huippuarvo.

Jos oikosulkupiirin vastaimpedanssi ja myötäimpedanssi ovat yhtä suuret, saadaan kaksivaiheisen ja kolmivaiheisen oikosulkuvirran suhteeksi [6]:

$$\frac{i_{p3}}{i_{p2}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

, ja koska oikosulkuvoimat ovat suoraan verrannollisia vikavirtojen suuruuksiin, aiheuttaa kolmivaiheinen vika kaavan mukaan noin 15 % suuremmat voimat kaksivaiheiseen vikaan verrattuna. Tämä olettaus pitää hyvin paikkaansa kaukana generaattorista tapahtuvissa vioissa.

Jos vaihekisko koostuu useista osajohtimista, aiheuttaa siinä kulkeva oikosulkuvirta suurimman voiman uloimmaiseen osajohtimeen. Sen maksimi voidaan IEC 60865 standardin mukaan laskea kaavalla:

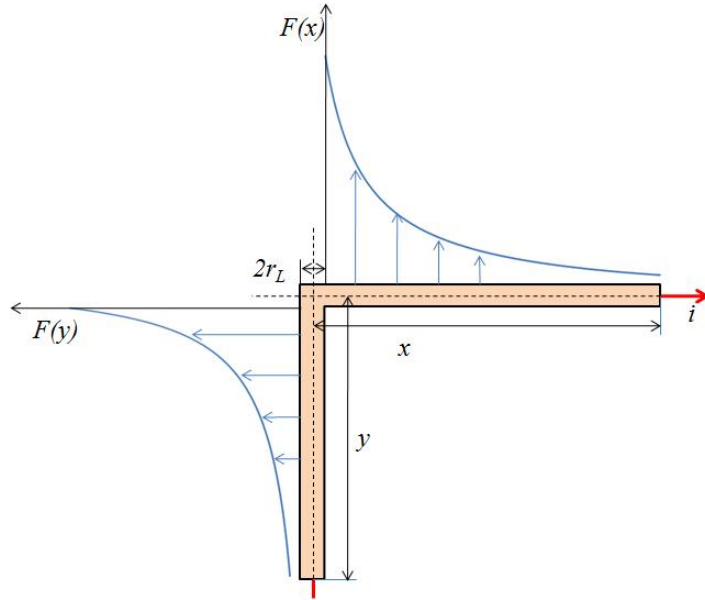
$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (21)$$

jossa  $n$  on osajohdinten lukumäärä,  $l_s$  on pisin kahden perättäisen yhdyssiteen tai yhdyssiteen ja viereisen tukieristimen välinen etäisyys,  $a_s$  on osajohdinten välinen tehollinen etäisyys ja  $i_p$  on oikosulkuvirran huippuarvo. Tässä oikosulkuvirran huippuarvoa määriteltäessä on syytä tarkistaa myös maasulut, joissa saattaa impedanssien suhteista riippuen esiintyä suurimmat vikavirrat.

Edellä mainitut kokoojakiskojen oikosulkuvoimia käsittelevät laskelmat edellyttivät, että johtimet olivat samassa tasossa. Jos näin ei ole, voidaan yleistä kaavaa (11) hyväksi käyttäen johtaa tarkasteltavaan tapaukseen sopiva kaava. Tästä esimerkkinä kuvan 9 mukainen suorakulmaan taivutettu johdin, jollaista esiintyy mm. päätykentissä ja alastuloköysissä. Johtimen vaakasuoraan osaan kohdistuvalle kokonaisvoimalle voidaan johtaa lauseke:

$$F(x) = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{x \left( y + \sqrt{y^2 + r_L^2} \right)}{r_L \left( y + \sqrt{y^2 + x^2} \right)} \quad (22)$$

Vastaavasti pystysuoralle osuudelle kohdistuva kokonaisvoima saadaan vaihtamalla kaavassa  $x$  ja  $y$  keskenään.



Kuva 9: Taivutettuun virralliseen johtimeen kohdistuva sähkömagneettinen voima.  $i$  on johtimen virta,  $r_L$  on johtimen säde,  $x$  on johtimen pituus vaakasuunnassa ja  $y$  on johtimen pituus pystysuunnassa.

### 2.3.3 Mekaaniset vaikutukset

Nämä edellä kuvatut oikosulkuvoimat aiheuttavat rasituksia ja muita mekaanisia vaikutuksia toisaalta johtimille itselleen ja toisaalta niiden kiinnitys- ja tukirakenteille liittimet mukaan luettuna. Näiden rasitusten luonne riippuu paljolti siitä käytetäänkö jäykkiä kiskoja vai taipuisia johtimia eli köysiä. Sen vuoksi tämän asian käsittelykin on seuraavassa jaettu vastaaviin osiin.

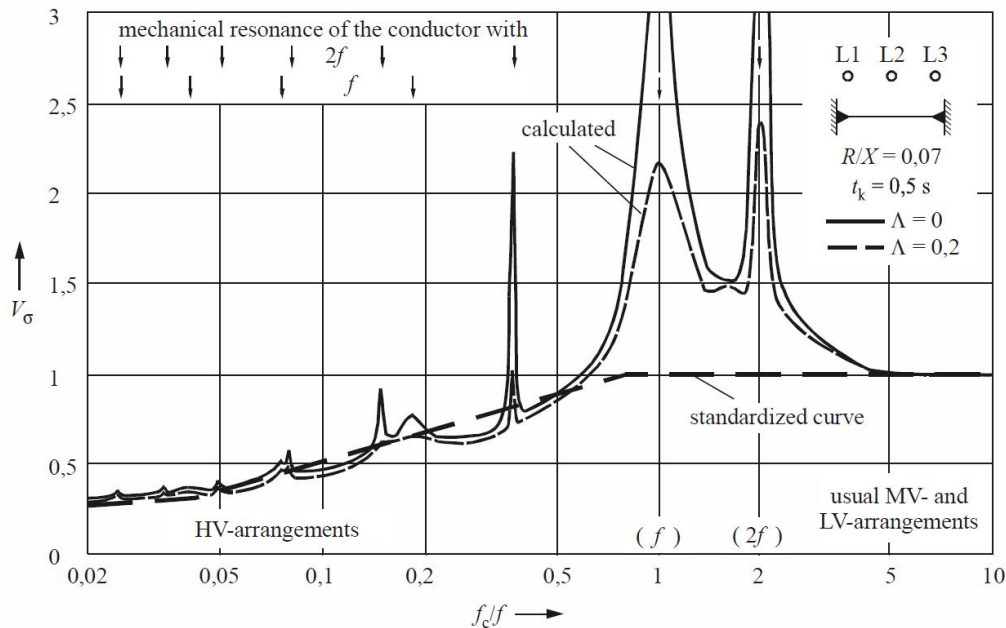
#### Jäykät kiskot

Laskettaessa jäykkien kiskojen oikosulkuvoimia oletetaan, että niiden välinen etäisyys pysyy muuttumattomana oikosulun aikana. Tällöin mekaanisia vaikutuksia koskevat yhtälöt ovat lineaarisia ja kokonaisvaikutusten laskentaan voidaan käyttää ns. superpositiomenetelmää. Laskelmissa oletetaan myös, että aksiaalisia voimia ei oikosulun vaikutuksesta esiinny. Fysikaalisena mallina laskelmissa käytetään taivutettua palkkia.

Sähköaseman kokoojakiskoina käytetään nykyään lähes poikkeuksetta putkia, jotka on valmistettu alumiinisekoitteesta AlMgSi. Näillä seosalumiiniputkillla on kiistatonta etuja köysiin ja kupariputkiin nähden, mutta niillä on kuitenkin se huono ominaisuus, että ne jäykkyytensä ja keveytensä vuoksi saattavat helposti alkaa vä-

rähdellä [7]. Tämä värähtely lisää kiskon ja sen tukirakenteiden rasituksia ja saattaa aiheuttaa väsymis- ja ääni-ilmiöitä [1].

Tämä värähtely on otettava mitoituksessa huomioon. Vaikka kolmivaiheisessa oikosulussa suurin voima kohdistuikin keskimmäiseen vaiheeseen, ei se silti välttämättä merkitse sitä, että siihen kohdistuva mekaaninen kokonaisrasitus olisi suurin, kun tämä värähtelyn vaikutus otetaan huomioon. Kuten kaavasta (17) kävi ilmi, sisältää voima sekä verkon taajuudella että verkon toisella harmonisella taajuudella värähtelevät komponentit, eli 50 Hz:n verkossa taajuudet 50 Hz ja 100 Hz. Jos kiskojärjestelmän ominaistajuus on jompikumpi näistä tai hyvin lähellä niitä, syntyy mekaaninen resonanssi, joka vahvistaa kiskojärjestelmään kohdistuvia mekaanisia rasituksia. Tämä näkyy kuivista 10 ja 11, joista ensimmäinen kuvaa ominaistajuuden vaikutusta kiskon rasitukseen ja jälkimmäinen ominaistajuuden vaikutusta tukieristimen rasitukseen. Näissä kuvissa  $V_\sigma$  ja  $V_F$  ovat kertoimia, jotka ottavat ominaisvärähtelyn vaikutuksen huomioon kiskon ja vastaavasti sen tukieristimen rasitukseen.

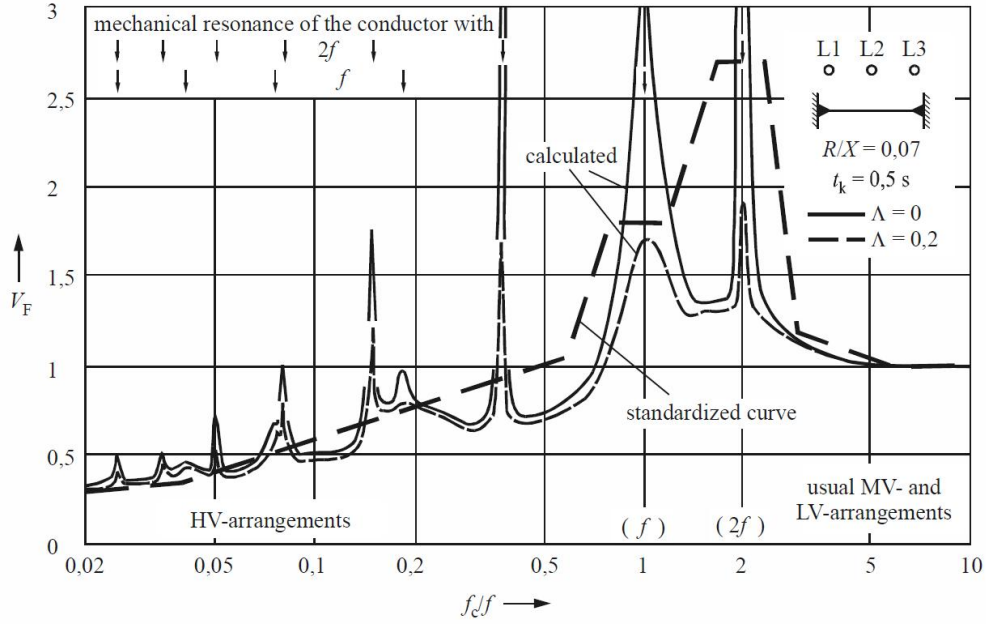


Kuva 10: Kiskon ominaistajuuden vaikutus vaiheiden L1 ja L3 kiskojen rasitukseen (kerroin  $V_\sigma$ ) kolmivaiheisessa oikosulussa.  $\Lambda$  on logaritminen vaimennus ja  $t_k$  on vika-aika. [10]

Kiskon ominaistajuus taivutuksessa saadaan yhtälöstä:

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad (23)$$

jossa  $\gamma$  on kiskon tuennan huomioiva kerroin,  $E$  on kiskon kimmokerroin,  $J$  on kiskon aksiaalinen pintamomentti,  $l$  kiskon tukipisteiden väli ja  $m'$  on kiskon massa



Kuva 11: Kiskon ominaistaaajuuden vaikutus vaiheiden L1 ja L3 tukieristimien rasitukseen (kerroin  $V_F$ ) kolmivaiheisessa oikosulussa.  $\Lambda$  on logaritminen vaimennus ja  $t_k$  on vika-aika. [10]

pituusyksikköä kohden [9].

Jos kisko koostuu suorakaiteen muotoisista osajohtimista, saadaan ominaistaaajuus silloin yhtälöstä:

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (24)$$

jossa  $c$  on osajohdinten yhdyssiteiden vaikutuksen huomioiva kerroin,  $J_s$  on osajohtimen aksiaalinen pintamomentti ja  $m'_s$  on osajohtimen massa pituusyksikköä kohden [9].

Osajohtimen rasitusta laskettaessa käytetään ominaistaaajuutta, joka saadaan yhtälöstä:

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (25)$$

Kaavat (23) ja (24) eivät ota huomioon kiskon tukirakenteiden elastisuutta, joten todellisuudessa kiskojärjestelmän ominaistaaajuus on laskettua arvoa hieman alhaisempi. Esimerkiksi valutukieristimillä on ominaistaaajuuden pieneneminen todettu

olevan n. 20 % [1]. Tästä on yleensä etu mitoituksen kannalta, ellei ominaistajuuden aleneminen johda siihen, että joudutaan resonanssialueelle. Siksi tämä asia täytyy ottaa huomioon, varsinkin jos  $f_c/f > 2,4$  [8].

Järjestelmän ominaistajuus vaikuttaa sen nopeuteen reagoida ulkoisiin voimiin. Jos  $f_c/f \gg 1$ , seuraa rasitus voimaa käytännössä samanaikaisesti. Jos  $f_c/f \ll 1$ , seuraa rasitus voimaa pienellä viiveellä ja on kooltaankin pienempi harmonisia resonanssialueita lukuun ottamatta. Tämän viiveen ansiosta on vielä mahdollista pienentää rasituksia tehokkaasti kytkemällä vika nopeasti pois, eli ennekuin rasitus saavuttaa huippuarvonsa. Tämä huippuarvo saavutetaan, kun oikosulun syntyhetkestä on kulunut ominaistajuuden puolen jakson aika. [7]

Värähtely vaikuttaa kolmivaiheisessa oikosulussa siten, että suurin rasitus kohdistuu keskimmäiseen vaiheeseen, jos suhde  $f_c/f > 1$  ja muussa tapauksessa uloimmaisiin vaiheisiin [10]. Suurjännitejärjestelmissä, kuten sähköasemilla, tämä suhde on yleensä alle 0,5, joten uloimmat vaiheet joutuvat niissä silloin suuremmalle rasitukselle keskivaiheeseen verrattuna [9].

Oikosulkuvoima aiheuttaa kiskon taipumisen ja mahdollisesti pienen muodonmuutoksen. Laskelmissa sallitaan muodonmuutos, joka on 1 % tukivälin pituudesta. Näin pienen muodonmuutoksen ei katsota aiheuttavan vaaraa käytön turvallisuudelle, ellei se sitten aiheuta sallittujen jännite-etäisyyksien alittumista. Muodonmuutoksen salliminen mitoituksessa alentaa kiskon lujuusvaatimuksia ja mahdollistaa näin taloudellisemman ratkaisun. Tällainen muodonmuutos on kuitenkin käytännössä hyvin harvinaista [1].

Rasituksiin liittyvät laskelmat suoritetaan statiikan keinoin ottamalla dynaamiset vaikutukset huomioon erityisillä kertoimilla. Kiskon rasitus on suurimmillaan silloin, kun sen taipumakin on suurimmillaan. Tämä maksimi taivutusrasitus saadaan yhtälöstä:

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_m l}{8Z} \quad (26)$$

jossa  $V_\sigma$  on ominaisvärähtelyn vaikutuksen huomioiva kerroin (ks. kuva 10),  $V_r$  on kolmivaiheisen jälleenkytkennän huomioiva kerroin,  $\beta$  on kiskon tuennan vaikutuksen huomioiva kerroin,  $F_m$  on maksimivoima kaavoista (18) ja (19),  $l$  on kiskon tukipisteiden väli ja  $Z$  on kiskon taivutusvastus [9].

Jos yhtenäisen kiskon tukivälit  $l$  poikkeavat toisistaan, tulee laskelmissa käyttää pisintä mitta. Mikään tukiväli ei kuitenkaan tässä tapauksessa saisi alittaa 20 % viereisen tukivälin pituudesta, koska tukivälien pituuksien ero lisää kiskon resonanssia. Tämä voidaan välttää katkaisemalla kisko tukieristimen kohdalta ja liittämällä kiskon päät yhteen taipuisalla johtimella. [10]

Jos kisko koostuu osajohtimista, saadaan osajohtimeen kohdistuva maksimi taivutusrasitus yhtälöstä:

$$\sigma_s = V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F_s l_s}{16 Z_s} \quad (27)$$

jossa  $V_{\sigma s}$  on ominaisvärähtelyn vaikutuksen huomioiva kerroin,  $V_{rs}$  on kolmivaiheisen jälleenkytkennän huomioiva kerroin,  $F_s$  on yhtälöstä (21) saatava voima,  $l_s$  on pisin kahden perättäisen yhdyssiteen tai yhdyssiteen ja viereisen tukieristimen välinen etäisyys ja  $Z_s$  on kiskon osajohtimen taivutusvastus [9].

Kiskon maksimi kokonaisrasitus taivutuksessa saadaan laskemalla yhteen kiskon ja sen osajohtimen maksimirasitukset:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m + \sigma_s \quad (28)$$

Kiskon oletetaan kestävävän tämän kokonaisrasituksen, jos:

$$\sigma_{\text{tot}} < q R_{p0,2} \quad (29)$$

jossa  $R_{p0,2}$  on kiskomateriaalin myötöraja ja  $q$  kiskon muodosta riippuva elastisuuskerroin. Esimerkiksi putkelle tämä elastisuuskerroin saadaan yhtälöstä:

$$q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4} \quad (30)$$

jossa  $D$  on putken ulkohalkaisija ja  $s$  on putken seinämän paksuus. [9]

Osajohtimelle sallitaan pienempi rasitus, jolla halutaan varmistaa, ettei osajohdinten välinen etäisyys muuttuisi oikosulun aikana liian paljon. Sen vuoksi osajohtimelle sallitaan, että

$$\sigma_s < R_{p0,2} \quad (31)$$

Tässä edellä käsiteltiin itse kiskoon kohdistuvia rasituksia, mutta kuten tämän luvun alussa todettiin, aiheuttavat oikosulkuvoimat yhtä lailla rasituksia myös sen tukirakenteille. Kiskoon vaikuttava oikosulkuvoima vääntää tukieristintä voimalla, joka saadaan yhtälöstä:

$$F_d = V_F V_r \alpha F_m \quad (32)$$

jossa  $V_F$  on kiskon ominaisvärähtelyn vaikutuksen huomioiva kerroin (ks. kuva 11),  $V_r$  on kolmivaiheisen jälleenkytkennän huomioiva kerroin,  $\alpha$  on kiskon tuennan vai-

kutuksen huomioiva kerroin ja  $F_m$  on maksimivoima yhtälöistä (18) ja (19) [9].

Tukieristimen oletetaan kestävän tämän oikosulkuvoiman, jos se ei ylitä valmistajan eristimelle antamia lujuusarvoja [11]. Voimien vertailussa on otettava huomioon oikosulkuvoiman vaikutuspisteen ja lujuusarvoissa annetun voiman vaikutuspisteen mahdollinen ero. Tämä tehdään laskemalla molempien voimien momentit esim. tukieristimen juureen ja vertailemalla näitä arvoja keskenään [8]. Useat käyttäjät vaativat tähän mitoittukseen vielä lisävarmuutta määrittelemällä, että oikosulkuvoima saa olla korkeintaan 70 % lujuusarvoissa ilmoitetusta arvosta [7]. Tätä ei IEC 60865 standardi kuitenkaan vaadi.

Kaavalla (32) laskettua oikosulkuvoimaa  $F_d$  käytetään mitoitusperusteena myös tukieristimessä olevan kiskoliittimen sekä kiskojärjestelmän teräsrakenteiden mitoituksessa [9].

Kiskojärjestelmää suunniteltaessa voidaan rasitusten ja voimien laskenta sekä siihen liittyvät kestoisuustarkistukset tehdä vaiheittain seuraavan listan mukaisesti [9]:

1. Lasketaan kiskon ominaistajuus  $f_c$  kaavalla (23) tai (24) ja tarkistetaan, ettei ole vaaraa resonanssista. Jos vaara on olemassa, on syytä miettiä, voidaanko rakennetta muuttamalla resonanssi välttää. Tämä on tärkeää jo normaalia käyttötilannettakin ajatellen ääni-ilmiöiden välttämiseksi [1].
2. Lasketaan kiskon ja osajohtimen rasitusten  $\sigma_m$  ja  $\sigma_s$  ylärajat kaavoilla (26) ja (27) sillä oletuksella, että rasitus aiheuttaa kiskossa pienen muodonmuutoksen. Tällöin värähtelyn vaikutusta rasitukseen ei tarvitse ottaa huomioon. Jos kolminapainen jälleenkytkentä on käytössä, pitää laskea ylärajat myös siinä tapauksessa, että se on tilapäisesti kytketty pois päältä.
3. Lasketaan edellisen kohdan perusteella kokonaisrasituksen  $\sigma_{tot}$  yläraja kaavalla (28).
4. Tarkistetaan kiskon ja osajohtimen kestoisuudet kaavoilla (29) ja (31). Myötörajana  $R_{p0,2}$  tässä tarkistuksessa on käytettävä valmistajan ilmoittamaa minimiarvoa. Jos kestoisuudet eivät tarkistuksen mukaan ole riittäviä, siirrytään kohtaan 7.
5. Lasketaan tukieristimeen kohdistuvan oikosulkuvoiman  $F_d$  yläraja kaavalla (32) edellä lasketun kokonaisrasituksen perusteella. Jos kolminapainen jälleenkytkentä on käytössä, pitää huomioida myös se tilanne, että jälleenkytkentä on tilapäisesti kytketty pois päältä. Myötörajana  $R_{p0,2}$  tässä laskennassa on käytettävä valmistajan ilmoittamaa maksimiarvoa.
6. Tarkistetaan tukieristimen kestoisuus vertaamalla edellä laskettua oikosulkuvoimaa  $F_d$  tukieristimen valmistajan antamiin lujuusarvoihin.



7. Jos kohdissa 4 tai 6 tehtyjen tarkistusten perusteella kestoisuudet eivät ole riittäviä, lasketaan kiskon ja osajohtimen rasitukset  $\sigma_m$  ja  $\sigma_s$  uudelleen kaavoilla (26) ja (27) ottaen tällä kertaa ominaisvärähtelyn vaikutuksen huomioon. Jos kolminapainen jälleenkytkentä on käytössä, pitää laskelma tehdä myös siinä tapauksessa, että se on tilapäisesti kytketty pois päältä.
8. Lasketaan edellisen kohdan perusteella kokonaisrasitus  $\sigma_{tot}$  kaavalla (28).
9. Tarkistetaan kiskon ja osajohtimen kestoisuudet kaavoilla (29) ja (31). Tässä myötörajana  $R_{p0,2}$  on käytettävä valmistajan ilmoittamaa minimimiarvoa.
10. Lasketaan tukieristimeen kohdistuva oikosulkuvoima  $F_d$  uudelleen kaavalla (32) ottaen tällä kertaa ominaisvärähtelyn vaikutus huomioon. Jos kolminapainen jälleenkytkentä on käytössä, pitää laskelma tehdä myös siinä tapauksessa, että se on tilapäisesti kytketty pois päältä. Myötörajana  $R_{p0,2}$  tässä laskennassa on käytettävä valmistajan ilmoittamaa maksimiarvoa.
11. Tarkistetaan tukieristimen kestoisuus vertaamalla edellä laskettua oikosulkuvoimaa  $F_d$  tukieristimen valmistajan antamiin lujuusarvoihin.
12. Mikäli kohdissa 9 ja 11 tehtyjen tarkistusten perusteella kestoisuudet eivät vielä ole riittäviä, on kiskojärjestelmän suunnitelmaa muutettava ja palattava kohtaan 1.

Uusia sähköasemia suunniteltaessa kannattaa ominaisvärähtelyn vaikutus ottaa aina laskelmissa huomioon, varsinkin suuremmilla jännitetasoilla, joissa ominaistajuuDET ovat alhaisia [10]. Tällöin edellä olevasta listasta voidaan tarpeettomana jättää pois laskelmat, jotka liittyvät rasitusten ja voimien ylärajoihin, eli kohdat 2–6. Nämä ylärajoja koskevat kaavat sopivat parhaiten nopeaan, käsin tehtävään tarkistukseen johtuen niiden yksinkertaisuudesta. Kun laskelmat tehdään jonkin ohjelman avulla, kuten liitteessä B, voidaan laskelmaan helposti sisällyttää koko laskentaprosessi.

## Köydet

Sähköasemalla voidaan taipuisia johtimia eli köysiä käyttää kokoojakiskoina, liitosjohtoina kokoojakiskosta kojeille ja kojeiden välillä. Kokoojakiskoina köydet ripustetaan teräsrakenteille vetoeristimiä käyttäen. Kojeden väliset liitokset tehdään joko suoraan kojeelta toiselle tai tukieristintä välissä käyttäen.

Näihin köysiin kohdistuvat oikosulkuvoimat muuttuvat oikosulun aikana, koska niiden välinen etäisyys  $a$  muuttuu voimien vaikutuksesta oikosulun aikana. Köyden pituuskaan  $l$  ei pysy vakiona vaan pitenee jonkin verran oikosulun aikana oikosulkuvirran termisen vaikutuksen ja oikosulkuvoiman vetorasituksen vuoksi. Muun muassa näistä syistä johtuen oikosulun mekaaniset vaikutukset eivät ole köysillä lineaarisia. Tästä seuraa, että superpositiomenetelmää ei voida käyttää voimien ja rasitusten yhteisvaikutuksia laskettaessa, kuten jäykkien kiskojen kohdalla voitiin. Laskelmia

kuitenkin yksinkertaistetaan sillä oletuksella, että köysillä ei ole minkäänlaista taivutuslujuutta. Fysikaalisena mallina köysien kohdalla käytetään heiluria. [7]

Seuraavassa tullaan kuvaamaan oikosulkuvoimien mekaanisia vaikutuksia köysille yleisellä tasolla menemättä kovin syvälle yksityiskohtaisiin laskelmiin. Nämä laskelmat ovat paljon monimutkaisempia verrattuna jäykkien kiskojen kohdalla esitettyihin laskelmiin, eikä niitä sen vuoksi ole järkevää lähteä tässä yhteydessä kovin perusteellisesti käsittelemään. Yksityiskohtaisten laskelmien osalta viitataan IEC 60865 standardiin [9] ja liitteen B laskentaohjelman tulosteisiin.

Kun jäykkien kiskojen kohdalla puhuttiin kiskojärjestelmän ominaistuuksista, niin köysien kohdalla puhutaan köyden heilahtelun jaksonajasta ja se saadaan yhtälöstä:

$$T = 2\pi\sqrt{0,8\frac{b_c}{g_n}} \quad (33)$$

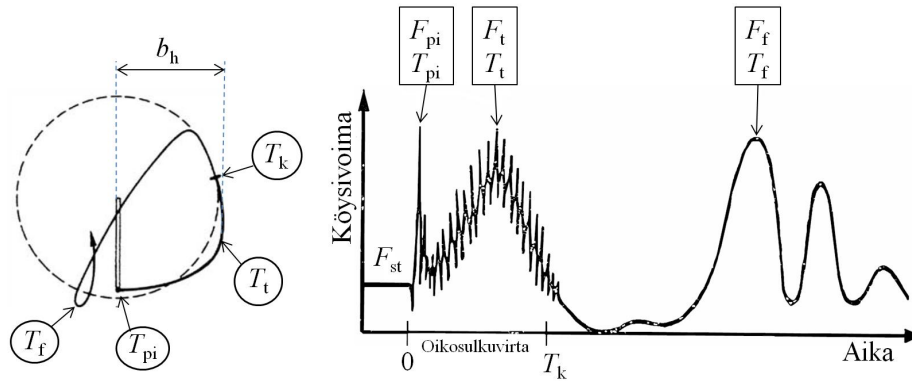
jossa  $b_c$  on köyden staattinen riippuma (ks. kuva 17) ja  $g_n$  on maan vetovoiman kiihtyvyys. Tämä kaava pätee virrattomalle köydelle pienillä heilahtelukulmilla. [9]

Oikosulkuvoimat aiheuttavat köysien sivuttaissuuntaisen heilahtelun ja nippuköydellä lisäksi ns. supistusilmiön (engl. pinch effect), jossa osajohtimet pyrkivät lähentymään toisiaan lyhentäen näin nippuköyden kokonaispituutta. Näitä ilmiöitä on havainnollistettu kuvissa 12 ja 13. Ne lisäävät köysien ja sen varusteiden veto- rasituksia, jotka puolestaan lisäävät taivutusrasituksia köysien tuki- ja kiinnitysrakenteissa. Köysien heilahtelu voi lisäksi aiheuttaa ns. sekundaarisen oikosulun tai maasulun vaiheiden joutuessa heilahtelun aikana liian lähelle toisiaan tai jotakin maadoitettua osaa [7].

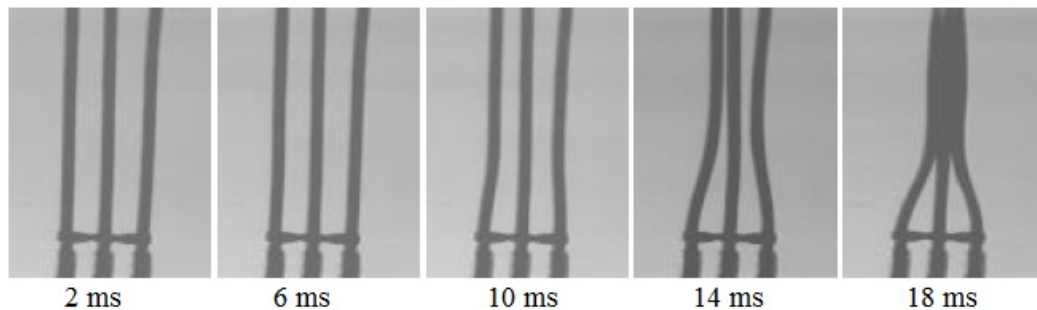
Kuvassa 12 on esitetty nippuköyden heilahtelu ja köysivoiman vaihtelu kaksivaiheisen oikosulun seurauksena. Tapahtumien kulku on seuraava:

1. Köysi on lepotilassa, jolloin köysivoima on köyden oman painon aiheuttama staattinen vetovoima  $F_{st}$ .
2. Kaksivaiheinen oikosulku tapahtuu ajanhetkellä 0.
3. Oikosulkuvoima saa osajohtimet puristumaan yhteen kuvan 13 mukaisesti. Tämä lyhentää äkillisesti nippuköyden pituutta aiheuttaen köysivoimaan pulssimaisen piikin ns. supistusvoiman. Tämän supistusvoiman huippu  $F_{pi}$  saavutetaan reilun puolen jakson kuluttua oikosulun syntyhetkestä, ajanhetkellä  $T_{pi}$ .
4. Värähtelevä oikosulkuvoima (ks. kaava 17) työntää johtimia yhä kauemmaksi toisistaan. Tämä lisää köysivoimaa ja saavuttaa huippuarvonsa  $F_t$  ajanhetkellä  $T_t$ , jolloin köysi on kauimpana lepotilastaan, etäisyydellä  $b_h$ .

5. Kun oikosulku kytkeytyy pois ja oikosulkuvoima lakkaa vaikuttamasta, jatkaa köysi vielä liikettään jonkin matkaa kunnes putoaa painovoiman vaikutuksesta alas. Tämä aiheuttaa ns. köyden pudotusvoiman, joka saavuttaa huippuarvonsa  $F_f$  ajanhetkellä  $T_f$ , köyden alimmassa kohdassa.
6. Köysi heilahtelee tämän jälkeen, vielä jonkin aikaa vaimenevasti puolelta toiselle aiheuttaen köysivoiman vaihteluita, kunnes palaa lepotilaansa.



Kuva 12: Nippuköyden heilahtelu kaksivaiheisen oikosulun seurauksena.  $F_{st}$  on staattinen köysivoima,  $F_{pi}$  on maksimi köysivoima nipun supistuksen aikana,  $F_t$  on maksimi köysivoima oikosulun aikana,  $F_f$  on maksimi köysivoima köyden pudotessa alas,  $T_{pi}$ ,  $T_t$ ,  $T_f$  ovat voimia  $F_{pi}$ ,  $F_t$  ja  $F_f$  vastaavat ajanhetket,  $T_k$  on oikosulkuvirran kesto-aika ja  $b_h$  on köyden maksimi horisontaalinen siirtymä. [10]

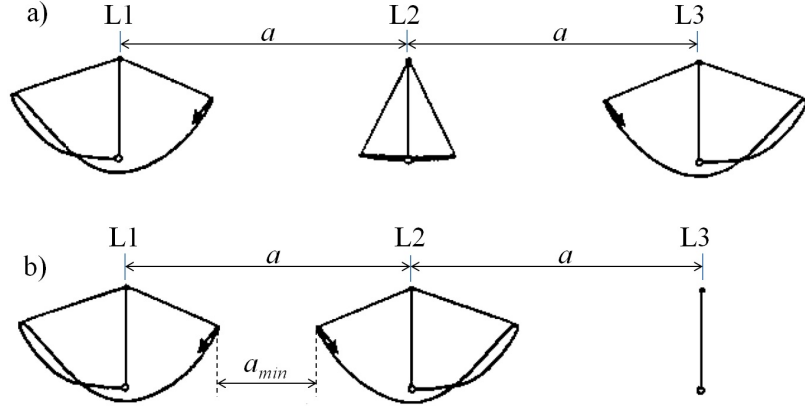


Kuva 13: Nippuköyden supistusilmiön kehitys oikosulun syntyhetkestä [16].

Kuvasta 12 nähdään, että voimien huippuarvot  $F_{pi}$ ,  $F_t$  ja  $F_f$  tulevat sen verran eriaikaisesti, että ne voidaan laskelmissa käsitellä erillisinä ilmiöinä. Tämä helpottaa laskelmien tekemistä oleellisesti.

Nämä köysivoimien huippuarvot ovat liki yhtä suuria, kun verrataan kaksivaiheisia kolmivaiheisia oikosulkuja keskenään. Kaksivaiheinen oikosulku on kuitenkin siinä mielessä pahempi, että se aiheuttaa kahden vierekkäisen köyden heilahduksen ensin toisistaan poispäin ja oikosulun poistuessa takaisin toisiaan kohti, jolloin

niiden välinen etäisyys  $a_{\min}$  menee paljon pienemmäksi normaalitilanteeseen nähden. Kolmivaiheisessa oikosulussa samaa ongelmaa ei synny, koska keskimäinen vaihe liikahtelee vain vähän johtuen voiman vaihtelusta puolelta toiselle ja köyden oman massan aiheuttamasta hitaudesta. Tätä asiaa on havainnollistettu kuvassa 14.



Kuva 14: Köysien heilunta oikosulkuvoimien vaikutuksesta: (a) kolmivaiheisen oikosulun aikana, (b) kaksivaiheisen oikosulun aikana. [7]

Niinpä köysien heilahteluun liittyvissä laskelmissa tulee virtana käyttää kaksivaiheista oikosulkuvirtaa. Oikosulkuvirran tasakomponenttia ei yleensä tarvitse huomioida, koska sen vaikutus on merkityksellinen vain oikosulun poiskytkentäajoilla  $T_k < 0,1$  s. Ottaen lisäksi huomioon heilahtelun suhteellisen hitauden käytetään laskelmissa oikosulkuvirran huippuarvon sijasta sen tehollisarvoa. [9]

Heilahteluihin liittyvä luonteenomainen voima pituusyksikköä kohden saadaan kaavaa (13) soveltaen:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{(I''_{k2})^2}{a} \frac{l_c}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 \frac{(I''_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I''_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} \quad (34)$$

jossa  $I''_{k2}$  on kaksivaiheisen alkuoikosulkuvirran tehollisarvo,  $I''_{k3}$  on kolmivaiheisen alkuoikosulkuvirran tehollisarvo,  $a$  on johtimien keskilinjojen välinen etäisyys,  $l$  on jännevälän pituus ja  $l_c$  on johtimen pituus jännevälillä. ( $l_c = l - 2l_i$ , jossa  $l_i$  on vetoeristinketjun pituus.) [9]

Tästä kaavasta saatua voimaa  $F'$  käytetään köyden heilahduskulmien laskemiseksi. Näiden kulmien avulla voidaan puolestaan laskea köysivoiman huippuarvot  $F_t$  ja  $F_f$  sekä köyden maksimi horisontaalinen siirtymä  $b_h$ . Pudotusvoimaa  $F_f$  ei välttämättä aina esiinny, jos oikosulkuvirta jää riittävän pieneksi tai se kytketään niin nopeasti pois, ettei köysi ehdi saavuttaa putoamisen kannalta kriittistä kulmaa. Tällöin se jää vain heilahtelemaan puolelta toiselle, kuten kuvassa 14 on esitetty. Lyhyillä jännevä-

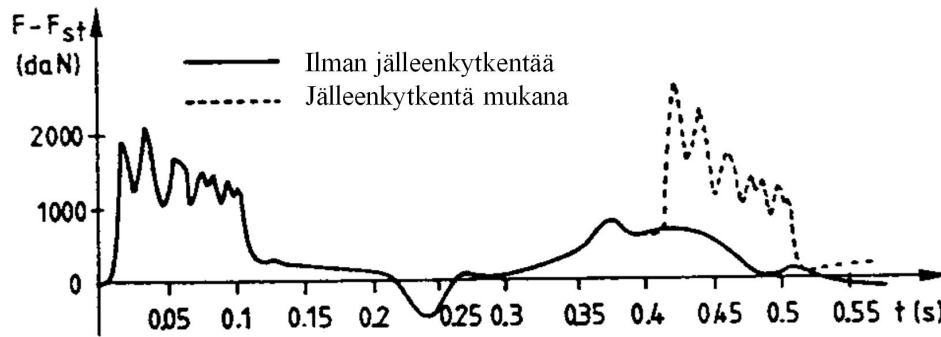
leillä ( $l < 100d_s$ ) taivutusjäykkyys saattaa myös alentaa köyden pudotusvoimaa. [9].

Supistusvoimaa  $F_{pi}$  nippuköydellä laskettaessa tulee virtana käyttää suurinta mahdollista vikavirtaa ottaen huomioon kaikki vikatyypit. Kun oikosulku tapahtuu kaukana generaattoreista, suurin vikavirta syntyy silloin kolmivaiheisessa oikosulussa. Kun taas oikosulku tapahtuu lähellä generaattoreita, voi kaksivaiheinen tai vaiheen ja maan välinen oikosulkuvirta olla kolmivaiheista oikosulkuvirtaa suurempi [6]. Tämän perusteella saadaan osajohdinten välinen voima laskettua yhtälöstä:

$$F_v = (n - 1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \frac{\nu_2}{\nu_3} \quad (35)$$

jossa  $n$  on osajohdinten lukumäärä,  $I_k''$  on suurin alkuoikosulkuvirta ( $I_{k3}'', I_{k2}''$  tai  $I_{k1}''$ ) ja kertoimet  $\nu_2$  sekä  $\nu_3$  ovat oikosulkuvirran käyrämuodon ja nippuköyden rakenteen huomioonottavia kertoimia [8]. Tämän osajohdinten välisen voiman  $F_v$  avulla lasketaan sitten varsinainen köysivoiman huippuarvo  $F_{pi}$  supistuksen aikana.

Jos automaattinen jälleenkytkentä on käytössä, saattaa epäonnistunut jälleenkytkentä vahvistaa heilahteluita ja lisätä köysivoimia. Heilahtelujen kannalta pahin tilanne sattuu silloin, kun epäonnistunut jälleenkytkentä tapahtuu köyden nopeuden ollessa heilunnan aikana suurimmillaan edellisen vian seurauksena. Voimien kannalta pahin tilanne on taas nippuköysillä silloin, kun epäonnistuneen jälleenkytkennän aiheuttama supistusvoiman huippu  $F_{pi}$  sattuu oikosulun jälkeisen köyden pudotusvoiman huipun  $F_f$  kohdalle, kuten kuvassa 15 on esitetty.



Kuva 15: Jälleenkytkennän vaikutus köysivoimaan nippuköydellä [7].

IEC 60856 standardin mukaan automaattista jälleenkytkentää ei kuitenkaan tarvitse ottaa köysien kohdalla huomioon, koska em. tapausten todennäköisyys on niin olematon. Joka tapauksessa jälleenkytkentöjen vaikutukset köysillä ovat paljon vähäisempiä jäykkiin kiskoihin verrattuna, joiden kohdalla ne ehdottomasti tuli ottaa huomioon [7], [9].

Oikosulkuvirran mekaanisten vaikutusten laskenta on köysien kohdalla tehtävä olettaen toisaalta mahdollisimman kylmät olosuhteet (esim.  $-40^{\circ}\text{C}$ ) ja toisaalta mahdollisemman lämpimät olosuhteet ml. virran aiheuttama lämpenemä nimelliskuormalla (esim.  $+60^{\circ}\text{C}$ ).  $F_{\text{pi}}$  ja  $F_t$  ovat yleensä suurimmillaan kylmissä olosuhteissa, kun taas  $F_f$  on yleensä suurimmillaan köyden lämpötilan ollessa korkeimmillaan. Köyden maksimi horisontaalinen siirtymä  $b_h$  on myös yleensä suurimmillaan silloin, kun köyden lämpötila on korkeimmillaan. [9]

Köysien, sen varusteiden ja tukirakenteiden oletetaan kestävän, alla mainittua poikkeusta lukuun ottamatta, jos valmistajan niille ilmoittamat lujuusarvot ovat suurempia kuin suurin lasketuista köysivoimista  $F_{\text{pi}}$ ,  $F_t$  ja  $F_f$ . (Nämä lasketut köysivoimat ovat horisontaalisia voimia, jotka sisältävät köyden omasta painosta aiheutuvan staattisen voimakomponentin  $F_{\text{st}}$ .) Useat käyttäjät vaativat tähän mitoittukseen vielä lisävarmuutta määrittelemällä, että oikosulkuvoima saa olla korkeintaan 70 % lujuusarvoissa ilmoitetusta arvosta [7]. Tätä ei IEC 60865 standardi kuitenkaan vaadi. Voimien vertailussa on otettava huomioon köysivoiman vaikutuspisteen ja lujuusarvoissa annetun voiman vaikutuspisteen mahdollinen ero. Tämä tehdään laskemalla näiden voimien momentit samaan vaikutuspisteeseen ja vertailemalla näitä momentteja keskenään. [9]

Tästä yleissäännöstä poiketen tukieristimille asennettujen köysien liittimiltä vaaditaan yo. suurempaa kestoisuutta oikosulun aikaisen köysivoiman suhteen, jota niiden tulee kestää vähintään  $1,5 F_t$ . Tässä kerroin  $1,5$  ottaa huomioon sen, että tukieristimien massan heilahteluja absorboivaa vaikusta ei voida ottaa liittimien mitoituksessa huomioon. [9]

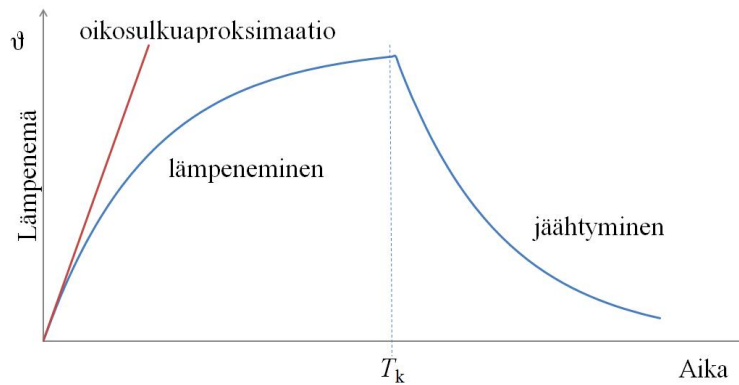
Kolmivaiheisia tukirakenteita (terästelineitä) mitoittaessa tulee ottaa huomioon, että kaksivaiheisen oikosulun aiheuttamat köysivoimat esiintyvät kahdessa rinnakkaisessa vaiheessa samanaikaisesti, kun taas kolmivaiheisessa oikosulussa ne esiintyvät kahdessa uloimmaisessa vaiheessa. Vaikka eri vaiheiden supistusvoimat tulevat kolmivaiheisessa oikosulussa eriaikaisesti, voidaan ne mitoituksen kannalta kuitenkin laskea kahteen vaiheeseen olettaen ne samanaikaisiksi. Niissä vaiheissa, joissa oikosulkuvoimia ei oikosulun aikana esiinny, on staattinen köysivoima  $F_{\text{st}}$  kuitenkin muistettava aina ottaa huomioon. [9]

Näiden mekaanisten rasitusten lisäksi tulee tarkistaa, ettei vaiheiden eikä vaiheen ja maan välisiä minimietäisyyksiä aliteta. Nämä minimietäisyydet on esitetty SFS 6001 standardissa. [4]

IEC 60865 standardissa esitetyt laskelmat pätevät 60 m mittaiseen jänneväliin saakka riippuman ollessa korkeintaan 8 %. Pitemmillä jänneväleillä voi köyden liike aiheuttaa pienempiä rasituksia kuin mitä laskelmat antavat [9].

### 2.3.4 Termiset vaikutukset

Laitteiden ja asennusten on kestettävä oikosulun mekaanisten vaikutusten lisäksi myös sen termiset vaikutukset. Oikosulkuvirta aiheuttaa oikosulkuvirran reitillä olevien johtimien, laitteiden ja liittimien lämpenemistä. Osa tästä lämpenemisestä siirtyy niiden ympäristöön johtumalla tai säteilemällä, kuten esimerkiksi tukieristimiin. Lämpeneminen alentaa materiaalien myötörajaa ja eristimien eristyskykyä. Jos lämpenemä ylittää sallitun kestoisuuden, voi seurauksena olla laitteen rikkoutuminen. Lämpeneminen aiheuttaa myös materiaalien laajentumisen, mikä pitää ottaa suunnittelussa huomioon.



Kuva 16: Johtimen lämpenemä ajan funktiona sekä oikosulkuaprosimaatio.  $T_k$  on oikosulun kesto aika.

Kuvassa 16 on esitetty johtimen lämpeneminen oikosulun aikana ja sen jälkeen. Oikosulkuvirta aiheuttaa johtimen resistanssissa tehohäviön, joka muuttuu ajan myötä lämmöksi johtimen sisällä. Osa tästä lämmöstä haihtuu johtimen pinnasta ympäristöön. Jos oikosulun kesto aika on lyhyt ( $< 5$  s), voidaan kuitenkin olettaa, ettei lämmön haihtumista ehdi tapahtua, eli kaikki lämpö jää johtimen sisälle. Tätä kutsutaan adiabaattiseksi lämpenemiseksi. Tällä oletuksella johdon lämpeneminen oikosulussa tapahtuu lineaarisesti ajan funktiona noudattaen kaavaa:

$$\vartheta = \frac{I^2 r}{mc} t \quad (36)$$

jossa  $I$  on johtimessa kulkevan virran tehollisarvo,  $r$  on johtimen resistanssi pituusyksikköä kohden,  $m$  johtimen massa pituusyksikköä kohden,  $c$  on johtimen ominaislämpökapasiteetti ja  $t$  on aika oikosulun alkuhetkestä.

Tämä ns. oikosulkuaprosimaatio helpottaa hyvinkin epälineaarisen lämpenemisilmiön matemaattista käsittelyä. Käsittelyä helpotetaan yleensä vielä sillä, että jätetään virranahto ja viereisten johtimien magneettiset vaikutukset huomioimatta, oletetaan resistanssi-lämpötila riippuvuus lineaariseksi ja että johtimen lämpötila pysyy vakiona määrättyllä lämpötila-alueella. Virranahtoon liittyvä oletus pätee poik-

kipinnoille  $A < 600 \text{ mm}^2$ . Jos poikkipinnat ovat tätä suurempia, tulee virranahdon vaikutus johtimen resistanssiin ottaa huomioon. [9]

Oikosulkuvirtaa käsittelevässä luvussa 2.3.1 esiteltiin jo käsitteet terminen oikosulkuvirta  $I_{\text{th}}$  ja terminen oikosulkukestoisuus  $I_{\text{thr}}$ , joiden avulla laitteiden ja asennusten kestoisuutta arvioitiin. Paljaiden johtimien ja joskus myös eristepäällysteisten kaapeleiden kohdalla käytetään tässä yhteydessä usein myös termistä oikosulkuvirran tiheyttä, jonka yhteys termiseen oikosulkuvirtaan saadaan yksinkertaisesti yhtälöstä:

$$S_{\text{th}} = \frac{I_{\text{th}}}{A} \quad (37)$$

jossa  $A$  on johtimen poikkipinta-ala. Kun oikosulun poiskytkentäaika hyvin lyhyt ( $< 0,2 \text{ s}$ ), antaa kaavan (5) mukainen Joule-integraali kuitenkin luotettavimman käsitteen termisestä kestoisuudesta. [8].

Johtimen jäähtyminen voidaan ottaa aikajälleenkytkennässä huomioon, muttei pikajälleenkytkennässä. Jos oikosulkuvirta epäonnistuneessa pikajälleenkytkennässä on yhtä suuri kuin sitä edeltänyt oikosulkuvirta, voidaan oikosulkujen kestoajat laskea suoraan yhteen. Muussa tapauksessa pitää ekvivalenttinen oikosulkuvirta laskea kaavalla:

$$I_{\text{th}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{k}}} \sum_{i=1}^n I_{\text{thi}}^2 T_{\text{ki}}} \quad (38)$$

jossa oikosulun ekvivalenttinen kesto aika saadaan yhtälöstä:

$$T_{\text{k}} = \sum_{i=1}^n T_{\text{ki}} \quad (39)$$

Johtimen jäähtyminen aikajälleenkytkennässä (ajk) voidaan ottaa huomioon, jos johtimen jäähtymisaikavakio tunnetaan. Jos oletetaan, että terminen oikosulkuvirta pysyy aikajälleenkytkennässä samana kuin sitä edeltäneissä vioissa, saadaan oikosulun ekvivalenttinen kesto aika tällöin yhtälöstä:

$$T_{\text{k}} = T_{\text{ajke}} e^{-T_{\text{ajk}}/\tau_{\text{j}}} + T_{\text{ajkj}} \quad (40)$$

jossa  $T_{\text{ajke}}$  on ajk:n jännitteetöntä väliaikaa edeltänyt vika-aika,  $T_{\text{ajk}}$  on ajk:n jännitteetön väliaika,  $T_{\text{ajkj}}$  on ajk:n jännitteettömän väliajan jälkeinen vika-aika ja  $\tau_{\text{j}}$  johtimen jäähtymisaikavakio.



Yhteenvedona luvusta 2.3.1 ja tästä luvusta voidaan tehdä se johtopäätös, että laitteiden ja asennusten oletetaan kestävän oikosulkuvirran termiset rasitukset, jos jokin seuraavista epäyhtälöistä toteutuu:

$$I_{\text{th}} \leq I_{\text{thr}} \quad , \text{ kun } T_{\text{k}} \leq T_{\text{kr}} \quad (41)$$

$$I_{\text{th}} \leq I_{\text{thr}} \sqrt{\frac{T_{\text{kr}}}{T_{\text{k}}}} \quad , \text{ kun } T_{\text{k}} \geq T_{\text{kr}} \quad (42)$$

$$S_{\text{th}} \leq S_{\text{thr}} \sqrt{\frac{T_{\text{kr}}}{T_{\text{k}}}} \quad , \text{ kaikilla } T_{\text{k}}\text{:n arvoilla} \quad (43)$$

$$\int_0^{T_{\text{k}}} i^2 dt = I_{\text{th}}^2 T_{\text{k}} \leq S_{\text{thr}}^2 T_{\text{kr}} A^2 \quad , \text{ kaikilla } T_{\text{k}}\text{:n arvoilla} \quad (44)$$

Yllä olevissa yhtälöissä  $I_{\text{th}}$  on ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta yhtälöstä (6) tai (38),  $I_{\text{thr}}$  on nimellinen lyhytaikaisen virran kestoisuus,  $S_{\text{th}}$  on ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirran tiheys yhtälöstä (37),  $S_{\text{thr}}$  on nimellinen lyhytaikaisen virrantiheyden kestoisuus,  $T_{\text{k}}$  on oikosulkuvirran kesto aika yhtälöstä (39) tai (40) ja  $T_{\text{kr}}$  on nimellinen oikosulkuvirran kesto aika. Se mikä näistä kaavoista kulloinkin valitaan, riippuu siitä, miten ko. laitteen valmistaja on nimelliskestoisuudet määritellyt. [9]

Oikosulkuvirran aiheuttama johtimen lämpöpiteneminen saadaan yhtälöstä:

$$\Delta l = \epsilon \vartheta l_0 \quad (45)$$

jossa  $\epsilon$  on johtimen lineaarinen lämpöpitenemiskerroin,  $\vartheta$  on oikosulun aiheuttama lämpenemä yhtälöstä (36) ja  $l_0$  on johtimen alkuperäinen pituus.

## 2.4 Taipuma- ja riippumalaskelmat

Vaakasuoraan tuetut tai ripustetut kappaleet käyristyvät aina enemmän tai vähemmän johtuen jo niiden oman painon aiheuttamasta kuormasta. Jäykkien kiskojen kohdalla puhutaan tällöin taipumasta ja köysien kohdalla puolestaan riippumasta. Näihin liittyviä laskelmia tarvitaan mm. jännite-etäisyyksien mitoittamiseen sekä rasitusten ja oikosulkuvoimien mekaanisten vaikutusten laskentaan.

Vaikka taipumassa ja riippumassa puhutaan periaatteessa samasta ilmiöstä, poikkeavat ne laskennallisesti kuitenkin sen verran toisistaan, että niitä on seuraavassa käsitelty omina kohtinaan.

## Jäykät kiskot

Jäykän kiskon taipumaan vaikuttavat sen tuennan jäykkyys sekä siihen vaikuttavat paino- ja tuulikuormat. (Kyllähän oikosulkuvoimatkin kiskoa taivuttelevat, mutta niiden vaikutukset ovat hyvin lyhytaikaisia edellisiin verrattuna.) Painokuormat aiheutuvat kiskon oman painon lisäksi ulkoisista painoista, kuten liittimistä, alastuloköysistä ja kiskon pinnalle kerääntyneestä jäästä. Jäykän putkikiskon oman painon aiheuttama taipuma saadaan yhtälöstä:

$$f = \frac{Ql^3}{iEJ} \quad (46)$$

jossa  $l$  on kiskon pituus (tuentapisteen välinen etäisyys),  $i$  on kiskon tuennan huomioiva kerroin,  $E$  on kiskon kimmokerroin,  $J$  on kiskon aksiaalinen pintamomentti ja  $Q$  on kiskon oman painon aiheuttama kuorma, joka saadaan yhtälöstä:

$$Q = m'g_n l \quad (47)$$

jossa  $m'$  on kiskon massa pituusyksikköä kohden ja  $g_n$  on maan vetovoiman kiihtyvyys. Jäykän putkikiskon oman painon aiheuttama taivutusrasitus saadaan puolestaan yhtälöstä:

$$\sigma_g = \frac{kQl}{Z} \quad (48)$$

jossa  $k$  on kiskon tuennan huomioiva kerroin ja  $Z$  on kiskon taivutusvastus [8]. Jääkuorman vaikutus tähän rasitukseen voidaan ottaa huomioon lisäämällä kaavassa (47) arvoon  $m'$  jään paino pituusyksikköä kohden. Se voidaan helposti laskea, kun tiedetään jään tiheys ja paksuus. (Jään tiheydeksi voidaan olettaa  $900 \text{ kg/mm}^3$  [9].)

Tuulikuorma pyöreille kiskoille, olettaen tuulen suunnaksi kohtisuoraan kiskoa vasten, saadaan yhtälöstä:

$$Q_w = q_0 D l \quad (49)$$

jossa  $q_0$  on tuulen paine,  $D$  putken ulkohalkaisija mukaan luettuna jääkerroksen paksuus ja  $l$  on putken pituus [17]. Tuulen aiheuttaman taivutusrasituksen  $\sigma_w$  laskentaan voi soveltaa kaavaa (48) korvaamalla putkikiskon painokuorma  $Q$  tuulikuormala  $Q_w$ . Rasituksen yhteenlaskennassa pitää niiden vaikutussuunnat ottaa huomioon vektorilaskennan keinoin. Painokuorman ja tuulikuorman aiheuttama kokonaisrasitus taivutuksessa saadaan tällöin yhtälöstä:

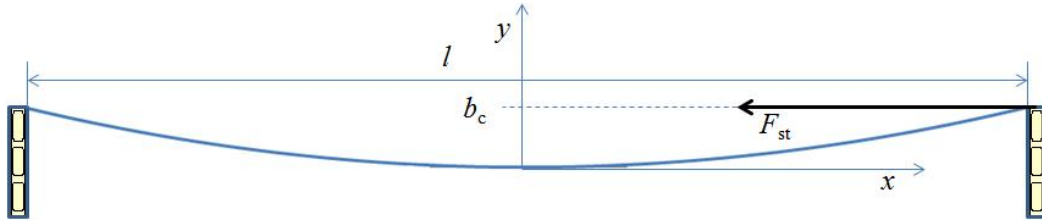
$$\sigma_{gw} = \sqrt{\sigma_g^2 + \sigma_w^2} \quad (50)$$

Putkikiskoja oletetaan kestävänsä oman painon ja jään aiheuttaman rasituksen, jos se on korkeintaan  $R_{p0.2}/1,7$ . Kun otetaan huomioon vielä tuulen aiheuttama rasitus,

saa kokonaisrasitus olla korkeintaan  $R_{p0.2}/1,5$ . Putken taipumalle ei ole vastaavaa teknistä raja-arvoa, vaan se määritellään lähinnä visuaalisin perustein. Tyypillisenä rajana käytetään  $l/150$  tai D ilman jääkuormaa ja  $l/80$  jääkuorman kanssa. [8]

## Köydet

Köyden riippumaan vaikuttavat sen oman painokuorman lisäksi tuulikuorma sekä esim. liittimien, vetoeristimien, alastuloköysien ja köyden pinnalle kerääntyneen jään aiheuttamat painokuormat. Näiden lisäksi riippumaan vaikuttavat köyden vetojännitys, köyden kiinnitysrakenteiden jäykkyydet ja köyden lämpötila.



Kuva 17: Köysikäyrä.  $l$  on jänneväli ja  $b_c$  on köyden staattinen riippuma.

Jos oletetaan, ettei köydellä ole lainkaan taivutusvastusta ja sen massa pituusyksikköä kohden on vakio, niin silloin se asettuu pylväille ripustettuna kuvan 17 mukaisesti noudattaen kaavaa:

$$y = \frac{\sigma_x A}{m' g_n} \left( \cosh \frac{m' g_n}{\sigma_x A} x - 1 \right) \quad (51)$$

jossa  $\sigma_x$  on köyden vetorasituksen vaakakomponentti ( $= F_{st}/A$ ) ja  $m'$  on köyden massa pituusyksikköä kohden. Kun  $x$ :n paikalle sijoitetaan  $l/2$ , saadaan köyden staattiselle riippumalle yhtälö:

$$b_c = \frac{\sigma_x A}{m' g_n} \left( \cosh \frac{m' g_n}{\sigma_x A} \frac{l}{2} - 1 \right) \quad (52)$$

Tämä kaava on taskulaskimella laskettaessa hiukan hankala käyttää, jonka vuoksi siitä on kehitelty erilaisia paraabeliin perustuvia likimääräisyyksiä. Nämä antavat yleensä riittävän tarkkoja likiarvoja, kun riippuma on pieni jänneväliin nähden. Esimerkkinä tästä likimääräisyydestä on ABB Switchgear Manual -käsikirjan [8] käyttämä kaava riippumalle:

$$b_c = \frac{m' g_n l^2}{8 \sigma_x A} \quad (53)$$

Kuten yo. yhtälöstä nähdään, köyden riippuma on kääntäen verrannollinen sen vetorasitukseen. Vetorasitus riippuu taas köyden lämpötilasta johtuen siitä, että köysi

pitenee lämpötilan noustessa. Näiden kahden tekijän, vetorasituksen vaakakomponentin  $\sigma_x$  ja köyden lämpötilan  $\vartheta$ , välinen yhteys selviää yhtälöstä:

$$\sigma_x^3 + \left[ E\epsilon(\vartheta - \vartheta_0) - \sigma_{x0} + \frac{E^2 l^2 \rho_0^2}{24 \sigma_{x0}^2} \right] \sigma_x^2 - \frac{El^2}{24} \rho^2 = 0 \quad (54)$$

jossa  $\rho_0$  ja  $\sigma_{x0}$  ovat referenssilämpötilaa  $\vartheta_0$  vastaavat arvot.  $\vartheta$  on köyden lämpötila ja  $\rho$  on köyden painovoima pinta- ja pituusyksikköä kohden, ja se saadaan yhtälöstä:

$$\rho = \frac{m' g_n}{A} \quad (55)$$

Jääkuorman vaikutus voidaan ottaa samalla tavalla huomioon kuin jäykällä kiskoillakin eli lisäämällä jään paino pituusyksikköä kohden arvoon  $m'$ . Myös tuulikuorma voidaan laskea käyttäen pyöreille kiskoille esitettyä kaavaa (49) sijoittamalla muutujan  $D$  arvoksi köyden halkaisija. Nippuköydellä tuulikuorma pitää vielä kertoa osajohtinten lukumäärällä, eli suojaavaa vaikutusta tuulen alapuolisiin osajohtimiin ei oteta huomioon [12].

Käytännössä köysi ei täysin noudata edellä esitettyä ideaalista köysikäyrää, vaan sitä vääristävät köyteen kytketyt pistekuormat (vetoeristimet, liittimet, ym.) ja tukieristimille asennetulla köydellä lisäksi sen jäykkyys, varsinkin lyhyillä jänneväleillä. Näihin tapauksiin liittyviä käytännön kaavoja ja käyrästäjä on esitetty mm. ABB Switchgear Manual -käsikirjassa [8].

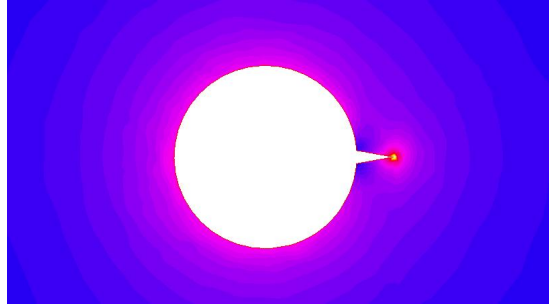
Köysien asennuksessa pitää myös niiden viruminen ottaa huomioon. Virumisella tarkoitetaan sitä, että köysi venyy pysyvästi, kun se kiristetään pylväiden väliin. Venymisen määrä riippuu köyden kiristyksestä, lämpötilasta ja ajasta. Viruminen on suurimmillaan heti asennuksen jälkeen mutta hidastuu pian sen jälkeen. Viruman arviointiin löytyy ohjeita esim. IEC 61597 -standardista [12].

Yleensä köyden murtolujuus ei ole mitoittava tekijä sähköasemalla, koska jännevälit ovat siellä suhteellisen lyhyet. Köyden maksimi vetojännitys  $\sigma_x$  määräytyykin lähinnä teräsrakenteiden kestoisuuksien mukaan ja maksimi riippuma  $b_c$  siten, että jännite-etäisyys maahan ja muihin johtimiin pysyy riittävän pitkänä kaikissa sää- ja käyttöolosuhteissa. Köyettä ei kannata jättää liian löysälle, koska silloin oikosulkuvoimien aiheuttamat köysien heilahtelut ovat laajempia. Toisaalta liika kireys kasvattaa oikosulkuvoimia. Sopivana arvona köyden riippumalle suhteessa jänneväliin nolla säässä voi käyttää 3 % vetoeristimille asennettuna ja 8 % tukieristimille asennettuna. [7]

## 2.5 Koronalaskelmat

Kun sähkökentän voimakkuus johtimien, eristimien tms. pinnalla kasvaa yli sen ympärillä olevan ilman (tai muun eristeaineen) jännitelujuuden, ilma ionisoituu ja muuttuu johtavaksi. Tämän seurauksena syntyy osittaissähköpurkauksia ko. pinnan ja sitä ympäröivän ilman välille. Näitä sähköpurkauksia kutsutaan koronaksi. Koska sähkökentän voimakkuus on verrannollinen pinnan kaarevuuteen, esiintyy koronaa ensin terävien reunojen kärjissä.

Kuvassa 18 on Ansoft Maxwell -ohjelman avulla laskettu sähkökentän voimakkuus pyöreänmuotoisen johteen ympärillä. Kuvan värit ilmaisevat, että sähkökentän voimakkuus on suurin johteen pinnassa olevan ulokkeen kärjessä, kun taas sen välittömässä läheisyydessä sähkökentän voimakkuus on selvästi alentunut. Tämä laskelma tukee edellisessä kappaleessa esitettyä väitettä.



Kuva 18: Sähkökentän voimakkuus johteen ympärillä. Väri muuttuu sinisestä punaiseen sähkökentän voimakkuuden kasvaessa. Kuva on tehty Ansoft Maxwell -ohjelman avulla.

Sähkökentän voimakkuus johtimen (köyden tai nippuköyden, jos  $n > 1$ ) pinnalla saadaan yhtälöstä:

$$E = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\chi}{r_s \ln \left( \frac{a_m}{r_e} \frac{2h}{\sqrt{4h^2 + a_m^2}} \right)} \quad (56)$$

jossa

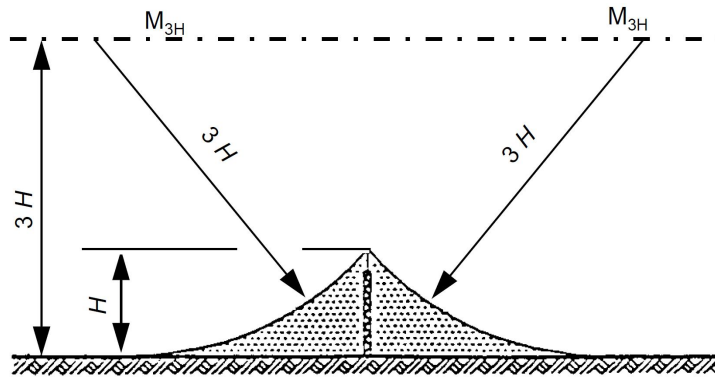
$$\chi = \frac{1 + (n-1)r_s/r_{ns}}{n}, \quad r_e = \sqrt[n]{nr_s r_{ns}^{n-1}}, \quad r_{ns} = \frac{a_s}{2 \sin(\pi/n)}$$

Yhtälöissä  $U$  on pääjännite,  $h$  on johtimen korkeus maan pinnasta,  $r_s$  on osajohtimen säde,  $a_m$  on pääjohtimien keskilinjojen välinen etäisyys,  $a_s$  on osajohdinten keskilinjojen välinen etäisyys ja  $n$  on osajohdinten lukumäärä [8].

SFS 6001 standardi ei määrittele hyväksyttävää raja-arvoa sähkökentän voimakkuudelle vaan vaatii, että koronan aiheuttamat radiohäiriöt eivät saa ylittää määriteltyä tasoa. Korona aiheuttaa myös häviöitä ja senkin vuoksi sähköasema on suunniteltava ja rakennettava niin, että korona pysyy kohtuullisissa rajoissa. Tämän kannalta sähkökentän voimakkuuden hyväksyttävänä rajana voidaan pitää 19–21 kV/cm [8]. Korona on merkittävää Suomessa käytännössä vain 400 kV:n jännitetasolla ja kostealla säällä, mutta jo 230 kV jännitteestä ylöspäin se on syytä ottaa suunnittelussa huomioon [12]. Talvella korona on suurempaa kuin kesällä johtuen mm. johtimien pinnalle kerääntyneestä huurteesta.

## 2.6 Ukkossuojaus

Ukkosessa ja siihen liittyvässä salamassa on periaatteessa kyse samasta ilmiöstä kuin edellisen luvun koronassa. Salaman aiheuttaa pilven ja maadoitetun osan välille syntynyt voimakas sähkökenttä, joka saa aikaan sähköpurkauksen. Mitä korkeammalla tämä maadoitettu osa on ja mitä terävämpi se on, sitä suuremmalla todennäköisyydellä salama siihen iskee. Tällainen muusta ympäristöstä korkeammalle sijoitettu maadoitettu osa, kuten esim. ukkosmasto kuvassa 19, toimii kuten uloke kuvassa 18. Tällä on lisäksi se vaikutus, että se alentaa kärjen alapuolella olevien maadoitettujen osien sähkökentän voimakkuutta ja tällä tavoin suojaa niitä salaman iskuilta. Myös tämän seikan voi todeta koronaa esittävästä kuvasta 18.



Kuva 19: Ukkosmaston suojausvaikutus [4].

Sähköasema on aina suojattava suorilta salamaniskuilta. Tämä voidaan toteuttaa edellä kuvatun periaatteen mukaisesti asentamalla sähköaseman alueelle riittävä määrä ukkosjohtimia tai -mastoja, jotka ulottuvat ympäröiviä laitteita ja asennuksia korkeammalle, ja maadoittamalla ne aseman maadoituselektrodiin. Tätä salamilta suojautumista kutsutaan ukkossuojaukseksi. Sen suunnittelu tehdään käytännössä aina graafisen menetelmän avulla. Tämä menetelmä perustuu osittain kokemukseräiseen tietoon, sen käyttäminen on helppoa ja SFS 6001 [4] standardi antaa siitä selkeät ohjeet. Kuvassa 19 on standardista otettu esimerkki ukkosmaston suojausvai-

kutuksesta. Tämän menetelmän mukainen suojausvaikutus antaa suuren varmuuden suoralta salaman iskulta aina 25 m korkeuteen saakka.

Salaman aiheuttama ylijännite voi tulla asemalle myös sille kytkettyjä avojohtoja pitkin. Tämän vuoksi on syytä, esimerkiksi laskelmien avulla varmistaa, etteivät ukkosen aiheuttamat ylijännitteet eivätkä myöskään kytkentäylijännitteet vaurioita muuntajaa. Jos tällainen vaara on olemassa, tulee muuntajan liittimiin kytkeä ylijännitesuojat. [4]

Käytännössä kannattaa muuntajan avojohtoverkkoon liittyvä puoli aina varustaa ylijännitesuojilla ja sijoittaa ne vielä mahdollisimman lähelle muuntajan napoja.

## 2.7 Maadoituslaskelmat

Sähköasemalla täytyy olla maadoitusjärjestelmä, johon kuuluvat johtavasti toisiinsa kytketyt maadoituselektrodit ja muut vaikutukseltaan vastaavat metalliosat (esim. pylväismaadoitukset, armeeraukset, metalliset kaapelivaipat) sekä maadoitusjohtimet ja potentiaalintasausjohtimet [4].

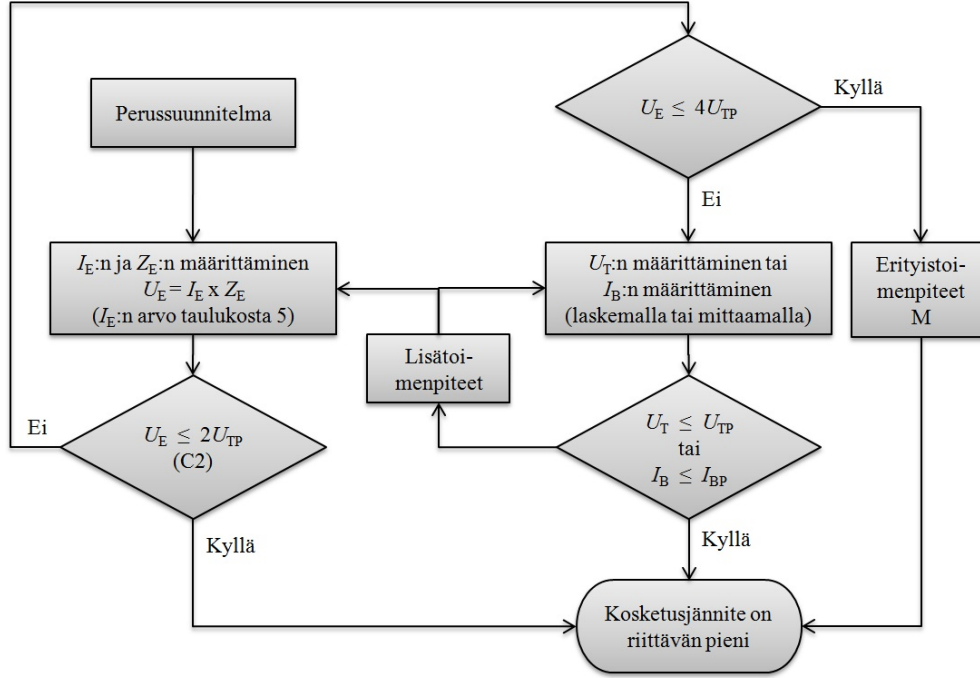
Maadoitusjärjestelmän pääasiallisena tehtävänä on johtaa maasulkuvirta takaisin sen syöttöpisteisiin niin, että siitä aiheutuva potentiaalin nousu ei aiheuta vaaraa ihmisille. Potentiaalin nousua esiintyy kaikissa maadoitetuissa rakenteissa ns. kosketusjännitteenä ja maan pinnassa ns. askeljännitteenä. Maadoitusjärjestelmältä itseltään vaaditaan mekaanista lujuutta, termistä kestoisuutta ja korroosiokestoisuutta.

Maadoitusjärjestelmän mitoituksen peruslähtöarvoina tarvitaan tiedot vikavirran suuruudesta, vian kestoajasta ja maaperän ominaisuudesta.

Kuvassa 20 on esitetty maadoitusjärjestelmän suunnittelun vaiheet. Perussuunnitelmassa valitaan maadoitusjärjestelmän rakenne ja siihen kuuluvat materiaalit mekaanisen lujuuden, termisen kestoisuuden ja korroosiokestoisuuden perusteella. Sähköaseman maadoituselektrodi on yleensä verkon muotoinen. Sen maadoitusresistanssi saadaan yhtälöstä:

$$R_{ES} = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L} \quad (57)$$

jossa  $\rho_E$  on maaperän resistiivisyys,  $D$  on verkon halkaisija ja  $L$  on maadoituselektrodin pituus [4]. Maadoitusimpedanssi saadaan laskettua ottamalla huomioon myös muut maadoitusjärjestelmään kytketyt vaikutukseltaan vastaavat metalliosat, kuten



Kuva 20: Maadoitusjärjestelmän suunnittelun kulku.  $U_E$  on maadoitusjännite,  $I_E$  on maavirta,  $Z_E$  on maadoitusimpedanssi,  $U_T$  on kosketusjännite,  $U_{TP}$  on sallittu kosketusjännite,  $I_B$  on kehon kautta kulkeva virta ja  $I_{BP}$  on sallittu, kehon kautta kulkeva virta. [4]

esim. pylväasmaadoitukset. Maadoitusimpedanssi saadaan yhtälöstä:

$$Z_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{ES}} + n \frac{1}{Z_{\infty}}} \quad (58)$$

jossa  $n$  on sähköasemalle kytkettyjen avojohtojen lukumäärä ja  $Z_{\infty}$  on ilmajohdon ukkosjohtimen ja pylväasmaadoitusten muodostaman ketjun impedanssi, kun johdon oletetaan olevan äärettömän pitkä. [4]

Maavirta  $I_E$ , eli maasulkuvirran maaperään siirtyvä virran osuus, riippuu sähköjärjestelmän maadoitustavasta ja sähköasemalle maasulkuvirtaa syöttävien avojohtojen ja kaapeleiden reduktiokertoimista. Impedanssin kautta maadoitetuissa järjestelmissä saadaan maavirta laskettua yhtälöstä:

$$I_E = \sum_{i=1}^n r_{Ei} \cdot 3I_{0i} \quad (59)$$

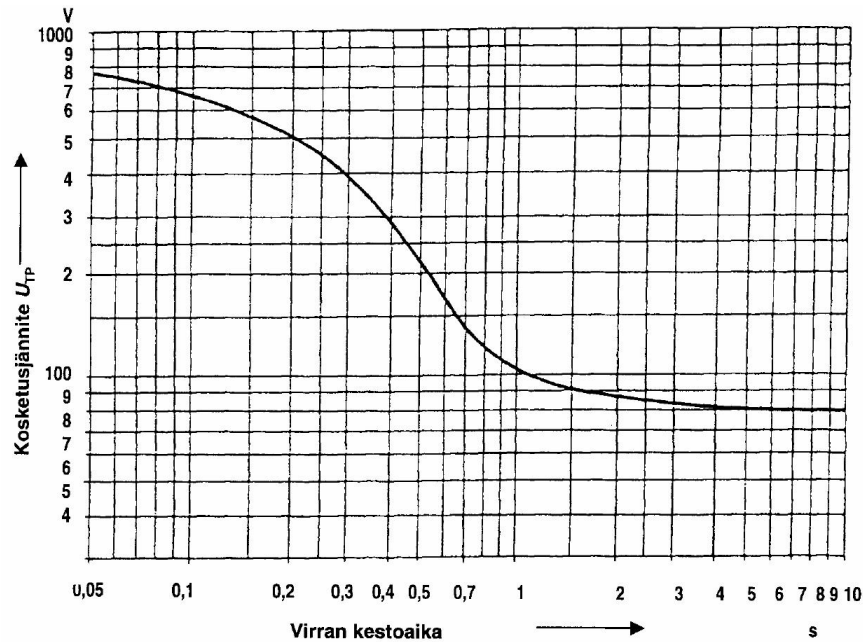
jossa  $r_E$  on johdon tai kaapelin reduktiokerroin,  $3I_0$  on johdon tai kaapelelin syöttämä maasulkuvirta ja  $n$  on maasulkuvirtaa syöttävien avojohtojen ja kaapeleiden lukumäärä. [4]



Maadoitusjärjestelmän potentiaalin nousu saadaan tämän jälkeen yksinkertaisesti Ohmin lain mukaan yhtälöstä:

$$U_E = I_E Z_E \quad (60)$$

Jos näin saatu maadoitusjännitteen arvo  $U_E$  on korkeintaan kaksinkertainen kuvassa 21 esitettyyn sallittuun kosketusjännitteeseen  $U_{TP}$  verrattuna tai jos asennus tulee osaksi laajaa maadoitusjärjestelmää, voidaan kosketusjännitteen olettaa jäävän riittävän pieneksi. Jos maadoitusjännitteen arvo on yli kaksi mutta korkeintaan neljä kertaa suurempi kuin sallittu kosketusjännite, voidaan erityistoimenpiteiden avulla vielä saada kosketusjännite riittävän alas. Muussa tapauksessa joudutaan muulla tavalla (tavallisesti mittaamalla) todistamaan, ettei sallittua kosketusjännitteitä ylitetä. [4]



Kuva 21: Sallitut kosketusjännitteet  $U_{TP}$  virran kestoajan funktiona [4].

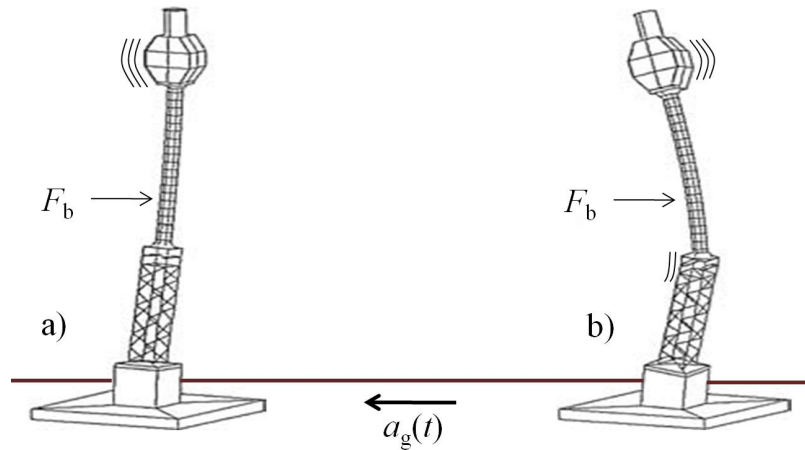
Askeljännitettä ei tarvitse SFS 6001 standardin mukaan erikseen huomioida vaan oletetaan, että jos kosketusjännitevaatimukset täyttyvät, niin askeljännitekään ei siinä tapauksessa nouse vaarallisen korkeaksi.

Käytännössä laskelmien tekeminen on edellä esitettyä jonkin verran monimutkaisempaa. Esimerkiksi maaperä on yleensä hyvin vaihtelevaa, jolloin sen resistiivisyyskin  $\rho_E$  vaihtelee niin sähköaseman alueella kuin syvyysuunnassakin. Laskelmat voivat vielä hankaloitua, jos maadoitusresistanssin pienentämiseksi joudutaan käyttämään lisämaadoituksia, kuten pystysuoraan asennettuja maadoitussauvoja tai vaakaelektrodeja. SFS 6001 ei vaadi maadoituslaskelmien tekemistä mutta vaatii kylläkin, että

sähköaseman maadoitusresistanssi mitataan ennen kuin se otetaan käyttöön tai viimeistään vuoden sisällä käyttöönotosta.

## 2.8 Maajäristysten vaikutusten laskenta

Maajäristykset aiheuttavat maankuoreen sekä horisontaalisia että vertikaalisia värähtelyitä. Näissä värähtelyissä maapohjan nopeus muuttuu ja vaihtaa suuntaa aiheuttaen kiihdyttäviä voimia sähköaseman laitteisiin ja asennuksiin kuvan 22 mukaisesti. Nämä voimat ovat niin ikään värähteleviä ja voivat synnyttää resonanssia, mikäli voimien taajuuudet ja laitteiden ominaistajuuudet osuvat samoiksi tai lähelle toisiaan.



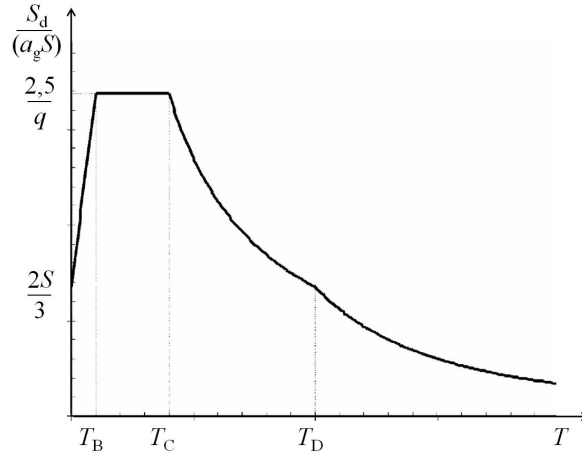
Kuva 22: Virtamuuntarakenteen värähtely maanjäristyksessä: (a) 1. harmoninen ominaistajuuus, (b) 2. harmoninen ominaistajuuus.  $a_g$  maapohjan kiihtyvyyys ja  $F_b$  on seisminen voima. [10]

Sähköaseman laitteiden (virtamuuntajat, katkaisijat, erottimet, ym.) ominaistajuuudet ovat suhteellisen alhaisia johtuen niiden painojakauman yläpainotteisuudesta. Ominaisaajuuus (perustaajuuus eli 1. harmoninen taajuuus) on suurusluokkaa 1–6 Hz ja on alempi suuremmilla jännitteillä, koska siellä laitteet ja rakenteet ovat korkeampia. Perustaajuuden lisäksi syntyy muitakin harmonisia taajuuksia, mutta niiden vaikutukset ovat vähäisempiä ja laskelmien yksinkertaistamiseksi ne jätetään yleensä tarkastelun ulkopuolelle. Kun ottaa huomioon, että maanjäristyksen taajuuudet liikkuvat myös yleensä alueella 0,1–30 Hz, on edellisessä kappaleessa mainittu resonanssin vaara ilmeinen. [10], [8]

Maanjäristyksen aiheuttama horisontaalinen, seisminen voima saadaan yhtälöstä:

$$F_b = \hbar m S_d(T_1) \quad (61)$$

jossa  $\hbar$  on tärkeyskerroin,  $m$  on laitteen massa (perustuksen yläpuolella oleva kokonaispaino),  $S_d(T_1)$  on suunnitteluvastespektri (t. kiihtyvyys) laitteen ominaistajuuden jaksonajalla. Suunnitteluvastespektri ottaa huomioon seismiset vaikutukset ja se voidaan laskea, kun tunnetaan maapohjaluokka, maapohjan huippukiihtyvyys ja laitteen rakenteesta riippuva vähennyskerroin. Esimerkki tällaisesta suunnitteluvastespektristä on esitetty kuvassa 23. [13]



Kuva 23: Suunnitteluvastespektri.  $S$  on maaparametri,  $q$  on vähennyskerroin,  $a_g$  maapohjan suunniteltu horisontaalinen huippukiihtyvyys,  $T_B$ ,  $T_C$  ja  $T_D$  ovat käyrän muotoon liittyviä parametreja. [13]

Jos laitteen ominaistajuutta vastaavaa muodonmuutosta approksimoidaan horisontaalisilla siirtymillä, jotka kasvavat lineaarisesti laitteen korkeussuunnassa, voidaan seismisen voiman jakautumista laitteessa tarkastella yhtälöllä:

$$F_i = F_b \frac{z_i m_i}{\sum z_j m_j} \quad (62)$$

jossa  $z_i$  ja  $z_j$  ovat massojen  $m_i$  ja  $m_j$  korkeuksia perustuksen yläpinnasta. [13]

Kokemusten mukaan sähköaseman asennukset kestävät hyvin myös maanjäristyksiä, jos ne on mitoitettu standardien mukaan kestäämään tuuli-, jää- ja oikosulkukuormia. Seisminen kuorma ei siis välttämättä ole mitoitettava tekijä sähköaseman rakenteille, ellei siihen yhdistetä samanaikaisesti suurta jääkuormaa. Suurempi ongelma maanjäristyksissä aiheutuukin perustusten siirtymisestä maapohjan liikkeessä. [13]

CIGRÉ:n julkaisussa 23-204 [14] on tutkittu sähköaseman laitteiden, kuten jännitemuuntajan, virtamuuntajan, erottimen ja katkaisijan vaurioitumisriskiä eri maapohjan kiihtyvyysarvoilla. Tutkimuksessa oli käytetty numeerisia menetelmiä ja sen tutkimuksen mukaan virtamuuntaja oli odotetusti sähköaseman kriittisin komponentti.

## 2.9 Melun laskenta

Ääni syntyy mekaanisista värähtelyistä, jotka aiheuttavat paineaaltoja ympäristöön taajuudella, joka on ihmisen kuuloalueella 16-20000 Hz. Koska ihmisen kuulon herkkyys on logaritmisesti verrannollinen tähän äänen paineeseen, käytetään äänipainetason mittayksikkönä logaritmista dB asteikkoa. Tätä asteikkoa korjataan vielä ns. A-painotuksella, joka ottaa huomioon kuulon herkkyyden eri taajuuksille. Kun äänen voimakkuus ylittää tietyn tason, käytetään siitä nimitystä melu. Suomessa Valtioneuvosto on päätöksessään 993/1992 antanut enimmäistasot tälle melulle. Ne on ilmoitettu A-painotettuina keskiäänitasoina tietyissä ympäristöissä.

Melua aiheuttavia laitteita sähköasemalla ovat lähinnä muuntajat ja reaktorit. Reaktoreissa ääntä synnyttävät sähkömagneettiset voimat ja muuntajissa lisäksi magnetostriktio ja tuulettimet. Muuntajien ja reaktoreiden A-painotettu äänitehotaso saadaan yhtälöstä:

$$L_{WA} = \overline{L_{PA}} + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad (63)$$

jossa  $\overline{L_{PA}}$  on keskimääräinen A-painotettu äänipainetaso mittausravista laskettuna,  $S$  on mittauala ja  $S_0$  on referenssi mittauala ( $= 1\text{m}^2$ ). Mittauala  $S$  lasketaan mittaustokteen ulkomittojen ja äänipainetason mittaustavan perusteella. [15]

Ääni leviää tasaisella ja esteettömällä alustalla säteittäisesti. Etäällä lähteestä oleva äänipainetaso voidaan tällöin laskea likimääräisesti yhtälöstä:

$$L_{PAR} = L_{WA} - 10 \log \frac{2\pi R^2}{S_0} \quad (64)$$

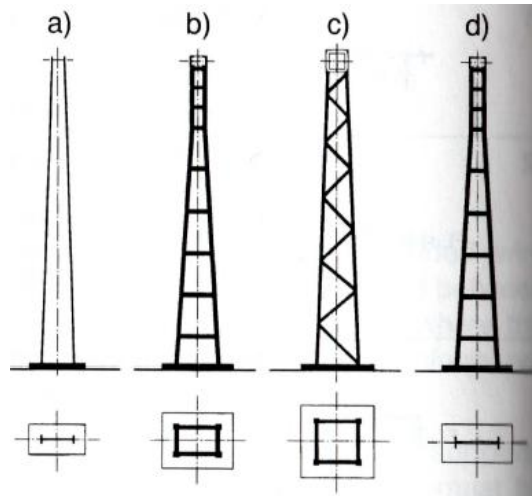
jossa  $R$  on etäisyys äänilähteestä ja vähintään 30 m. [15]

## 2.10 Teräsrakenne- ja perustuslaskelmat

Aikaisemmissa luvuissa on selvitetty tukirakenteisiin kohdistuvia ulkoisia voimia, jotka aiheutuivat mm. oikosulusta, lämpötilan vaihtelusta, tuulesta ja jäädä. Näiden ulkoisten voimien lisäksi kohdistuu tukirakenteeseen tietysti sen oman ja sen kannatteleman laitteen painon aiheuttamat kuormat. Eikä pidä myöskään unohtaa esim. katkaisijan ohjauksessa syntyviä dynaamisia voimia. Nämä voimat yhdessä aiheuttavat puristus-, taivutus- ja vääntörasituksia tukirakenteille, jotka tulee rakennelaskelmissa ottaa huomioon.

Sähköaseman laitteiden tukirakenteet on pääsääntöisesti valmistettu kuumasinkitystä teräksestä. Nämä teräsrakenteet tehdään muototeräksestä joko hitsaamalla

tai pulttiliitoksiin. Kuvassa 24 on esitetty tyypillisiä rakenneratkaisuja.



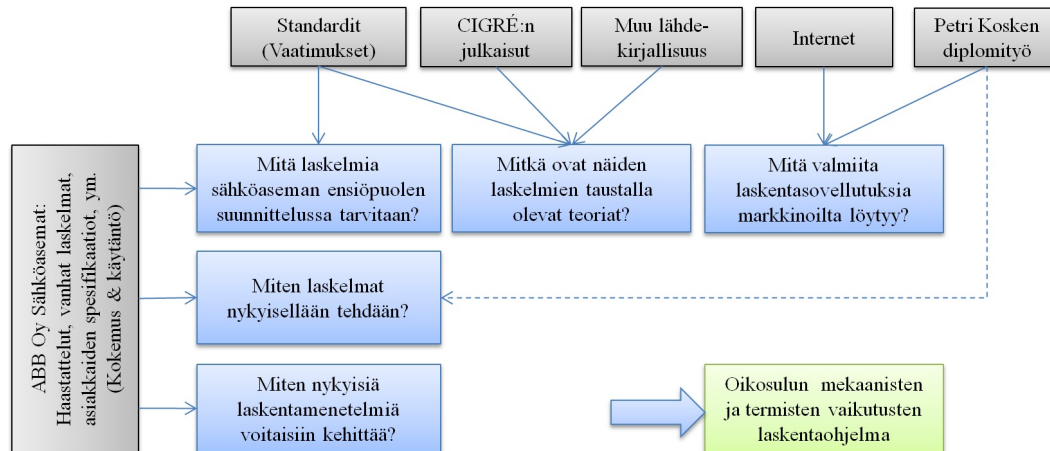
Kuva 24: Tukirakenneratkaisuja: (a) reunavahvisteinen, (b) kehysrakenteinen, (c) ristikkorakenteinen ja (d) A-pylväsrakenteinen tukirakenne. [8]

Tukirakenteeseen kohdistuvat voimat ja väännöt välittyvät tukirakennetta pitkin perustukseen. Voimat lasketaan taivutusmomenttien avulla vaikuttamaan perustuksen yläpäähän ja vääntömomentit siirretään niihin sellaisenaan. Kun voimat ja momentit on näin saatu selville ja maan kantokyky tiedetään, voidaan perustuksen mitoitus suorittaa. Laitteiden perustukset ovat teräksellä vahvistettua betonia, joihin on upotettu ankkuripultit teräsrakenteen kiinnittämistä varten. Ankkuripultit on myös valmistettu kuumasinkitystä teräksestä.

Tässä tutkimuksessa ei ole tarkoitus lähteä selvittämään varsinaisia teräsrakente- ja perustuslaskelmia tämän pitemmälle, vaan niiden osalta viitataan Suomen ympäristöministeriön rakentamismääräyskokoelman osaan B7: Teräsrakenteet ja osaan B4: Betonirakenteet.

### 3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Johdannossa asetettiin tämän tutkimuksen tavoitteet ja tässä luvussa kerrotaan, mitä aineistoa ja mitä menetelmiä on käytetty näiden tavoitteiden saavuttamiseksi. Tämä asia on kiteytetty kuvassa 25 esitettyyn kaavioon.



Kuva 25: Tutkimusaineisto- ja menetelmät tutkimustavoitteiden saavuttamiseksi.

Tutkimuksen aiheenahan oli laskentamenetelmien kehittäminen. Mutta ennen kuin päästään varsinaiseen kehitystyöhön, on ensiksi saatava siihen liittyvä teoria hallintaan ja tämän jälkeen vielä selvitettävä siihen liittyvä nykykäytäntö. Teorian hallinta korostuu tässä työssä, koska se on kaiken kehittämistyön perusta. Nykykäytännön tunteminen tukee tätä pyrkimystä ja näyttää suuntaa tulevalle kehitystyölle.

Tutkimuksen teoriaosuuteen liittyvä aineisto on lueteltu viitteissä. Näistä tärkeimpiä ovat SFS:n ja IEC:n standardit ja CIGRÉ:n julkaisut, kuten luvun 2 viittauksistakin ilmenee. Standardeissahan kerrotaan, yleensä suhteellisen lyhyesti, miten asennukset pitäisi suunnitella ja rakentaa. CIGRÉ:n julkaisut puolestaan täydentävät hyvin näitä standardeja kertomalla niihin liittyviä teoreettisia taustoja ja käytännön sovellutuksia. Tällä teoriaosuudella pyrittiin löytämään vastaukset tutkimuskysymyksiin siitä, mitä laskelmia ylipäättään tarvitaan ja mitkä ovat näiden laskelmien taustalla olevat teoriat.

Nykykäytännön selvittäminen on tehty pääasiassa ABB Oy Sähköasemat -yksikössä haastattelemalla sen työntekijöitä ja tutkimalla heidän vanhoja projektejaan. Heillä olikin paljon annettavanaan, sillä kuten tuossa johdannossa jo todettiin, heillä on pitkä ja monipuolinen kokemus tämän tutkimuksen aihealueelta. Jonkin verran on pyritty keräämään tietoa myös muilta sähköasemamarkkinoilla toimivilta yrityksiltä. Tässä on hyödynnetty mm. Petri Kosken tekemää diplomityötä [18], jossa asiaa oli jonkin verran raotettu Empower Oy:n näkökulmasta. Tällä nykykäytännön selvitystyöllä pyrittiin löytämään vastaukset tutkimuskysymyksiin siitä, mitä laskelmia joudutaan käytännössä tekemään, miten ne nykyisin tehdään ja miten ne haluttai-

siin tulevaisuudessa tehdä.

Osittain tuohon nykykäytäntöön liittyen on lähinnä Internetin avulla selvitetty, mitä ja minkälaisia laskentamenetelmiä markkinoilla on tänä päivänä tarjottavanaan. Tämä on tärkeä tieto kehitystyön kannalta, eli niin kuin vanha sanonta kuuluu ”ei kannata keksiä pyörää uudestaan”. Tässä markkinatutkimuksessa oli paljon hyötyä tuosta em. Petri Kosken diplomityöstä, jossa tätä asiaa oli perusteellisesti selvitetty – ja työkin oli suhteellisen tuore, eli vuodelta 2007. Tällä markkinatutkimuksella pyrittiin löytämään vastaus siihen tutkimuskysymykseen, mitä valmiita laskentasovellutuksia markkinoilta löytyy ja samalla arvioimaan niiden soveltuvuutta ABB Oy Sähköasemat -yksikön käyttöön.

Tätä em. tutkimusaineistoa ja selvitystyötä on lopuksi hyödynnetty kokonaan uuden laskentaohjelman suunnittelussa, ja tämän tuloksena on syntynyt Excel-ohjelma oikosulun mekaanisten ja termisten vaikutusten laskemiseksi.

## 4 Tulokset

Tässä osassa esitetään tutkimuksen tulokset, eli vastataan johdannossa esitettyihin tutkimuskysymyksiin sekä selostetaan oikosulun mekaanisten ja termisten vaikutusten laskentaan liittyvän tietokoneohjelman suunnittelu.

### 4.1 Vastaukset tutkimuskysymyksiin

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää ABB Oy Sähköasemat -yksikön ensiösuunnittelussa käytettäviä laskentamenetelmiä. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi ja toisaalta tutkimuksen rajaamiseksi määriteltiin seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Mitä laskelmia sähköaseman ensiöpuolen suunnittelussa tarvitaan?
2. Mitkä ovat näiden laskelmien taustalla olevat teoriat?
3. Miten laskelmat nykyisellään tehdään?
4. Miten nykyisiä laskentamenetelmiä voitaisiin kehittää?
5. Mitä valmiita laskentasovellutuksia markkinoilta löytyy?

Näihin kysymyksiin on etsitty vastauksia luvun 3 mukaisesta tutkimusaineistosta ja siinä esitetyin menetelmin. Seuraavassa esitetään, mitä vastauksia tämä tutkimus näihin kysymyksiin antoi.

#### 4.1.1 Mitä laskelmia tarvitaan?

Tähän kysymykseen saatiin vastaus luvussa 2.2, jossa käytiin läpi sähköaseman suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvät perusvaatimukset. Kappaleessa todettiin mm. se, että sähköaseman toimittajan tulee pääasiassa vastata siitä, että sähköasema valmistuttuaan täyttään nämä vaatimukset. Niidenhän katsottiin täyttyvän, jos suunnittelussa ja rakentamisessa kaikilta osin noudatettiin asiaankuuluvia standardeja, ja nämä standardithan määrittivät mm. tason, jolloin laitteiden ja asennusten oletettiin kestävän ennakoitavissa olevat rasitukset.

Tässä kohtaa on paikallaan huomauttaa se asia, että ei tässä toimittajan kannalta ole kysymys pelkästään joidenkin vaatimusten tai määräysten täyttämisestä vaan myös oman maineensa ja liiketoimintansa turvaamisesta pitkällä tähtäimellä. Jos nimittäin kävisi niin, että sähköasema vaurioituisi tai aiheuttaisi vahingon esim.



toimittajan virheellisen mitoituksen seurauksena, se varmasti vaikeuttaisi kauppajien saantia tulevaisuudessa. Standardien noudattaminen siis myös auttaa toimittajaa tässä suhteessa.

Standardien määrittelemä vaatimustenmukaisuus pitää tarvittaessa aina pystyä osoittamaan uskottavalla tavalla ja se täytyy yleensä tehdä ennen kuin asennukset otetaan käyttöön. Vaatimustenmukaisuus osoitetaan tavallisesti jo suunnitteluvaiheessa laskelmien avulla ja joskus myös kokeellisesti tai mittauksin, kun asennukset on saatu valmiiksi. Seuraavassa on lueteltu ne aiheet, joissa laskelmia yleensä aina tarvitaan:

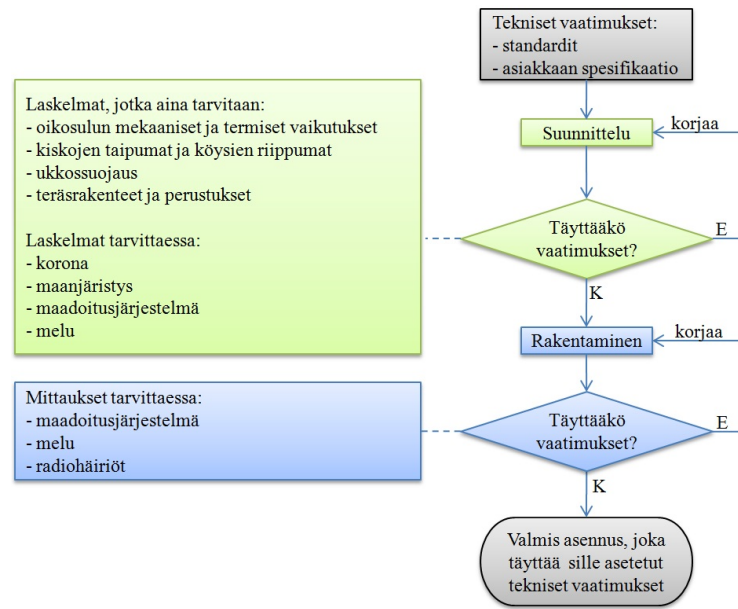
- oikosulun mekaaniset ja termiset vaikutukset
- kiskojen taipumat ja köysien riippumat
- ukkossuojaus
- teräsrakenteet ja perustukset.

Seuraavassa on lueteltu ne aiheet, joissa laskelmia ei välttämättä aina tarvita vaan ovat tapauskohtaisia ja riippuvat esim. ympäristötekijöistä:

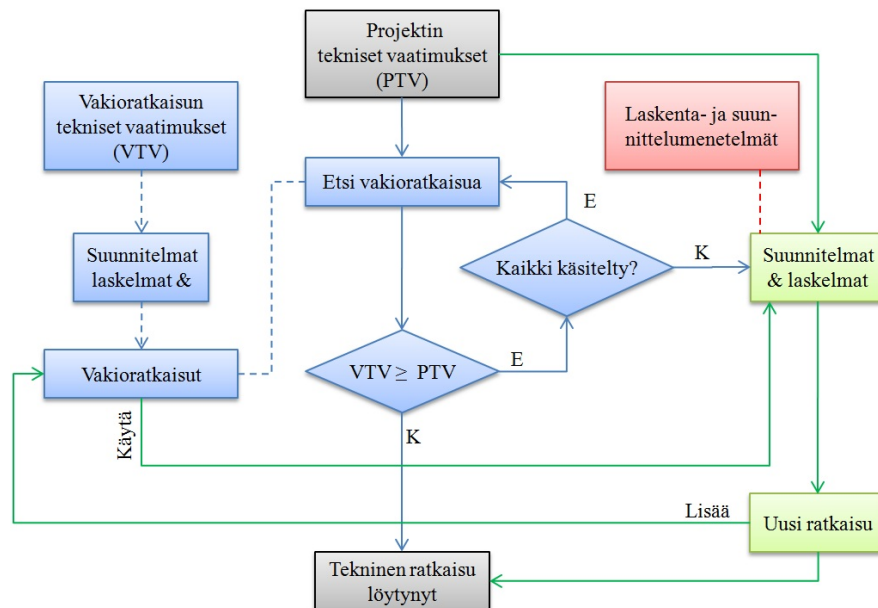
- korona, jos järjestelmän pääjännite on vähintään 220 kV
- maanjäristyksen vaikutukset seismisillä alueilla
- maadoitusjärjestelmä, jos se ei tule osaksi laajempaa maadoitusjärjestelmää
- melu asutusalueiden lähellä.

Käytännössä tämä laskelmien jaottelu ei ole aivan näin yksinkertaista, mutta antaa kuitenkin jonkinlaisen käsityksen laskelmien tarpeellisuudesta. Kuvassa 26 on vielä tätä samaa asiaa havainnollistettu vuokaavion avulla, jossa on huomioitu myös mitausten tarpeellisuus.

Joissakin tapauksissa voidaan laskelmat jättää kokonaan tekemättä, jos voidaan osoittaa, että uusi asennus ei vaatimustasoltaan ylitä aiemmin tehtyä asennusta, josta jo asianmukaiset laskelmat tai kokeelliset tulokset ovat olemassa. Tässä on silloin kysymys ns. vakioratkaisujen käytöstä. Menetelmää on havainnollistettu kuvassa 27. Sen mukaan projektin tekniisiin vaatimuksiin (PTV) haetaan ensin ratkaisua olemassa olevien vakioratkaisujen joukosta etsimällä sellaista vaihtoehtoa, jonka tekniset vaatimukset (VTV) ovat vähintään yhtä korkeat kuin PTV. Jos sellainen vaihtoehto löytyy, voidaan sitä käyttää suoraan teknisenä ratkaisuna. Jos sopivaa vakioratkaisua ei kuitenkaan löydy, joudutaan suunnittelemaan ja laskemaan uusi ratkaisu siten, että se täyttää PTV. Tällöin voidaan suunnittelun lähtökohtana käyttää lähinnä sopivaa vakioratkaisua. Tämä uusi ratkaisu voidaan sen jälkeen lisätä



Kuva 26: Vaatimustenmukaisuuden osoittaminen laskelmin ja mittauksin.



Kuva 27: Vakioratkaisujen hyödyntäminen suunnittelussa.

vakioratkaisujen joukkoon seuraavia projekteja varten. Vakioratkaisu voi olla joko yksittäisiä asennuksia tai suurempia kokonaisuuksia.

Vakioratkaisujen käyttö ei helpota pelkästään laskelmien tekemistä vaan koko suunnitteluprosessia, joten se on ihan tavoittelemisen arvoinen asia: ei vain teknisessä mutta myös taloudellisessa mielessä. Sähköasemien rakentamisessa on kuitenkin niin monta eri muuttujaa, että harvoin selvittää pelkillä vakioratkaisuilla vaan yleensä

tarvitaan lisäksi sovellutuskohtaista suunnittelua laskelmineen. Kuvasta 27 voi myös tehdä sen päätelmän, että mitä tehokkaampia yrityksen suunnittelu- ja laskentajärjestelmät ovat, sitä pienempiä ovat vakioratkaisuilla saavutettavat edut.

#### 4.1.2 Mitkä ovat näiden laskelmien taustalla olevat teoriat?

Tähän kysymykseen saatiin vastaus luvuissa 2.3–2.10. Tämän tutkimuksen aihealue on kohtalaisen laaja, ja jotta raportin sivumäärän ei olisi paisunut liian suureksi, kirjoittamisessa on pysytty melko yleisellä tasolla. Kustakin osa-alueesta on kuitenkin pyritty löytämään ja ottamaan mukaan oleelliset ja lukijan kannalta ehkä ne mielenkiintoisimmat asiat. Oikosulkulaskelmia on tästä poiketen käsitelty muita perusteellisemmin, koska ne ovat keskeisessä asemassa tämän tutkimuksen kannalta (ks. luku 4.2).

Laskelmien taustalla olevat teoriat ovat pääosin hyvin haastavia. Haastavuutta lisää se, että niiden ymmärtämiseksi pelkästään sähkötekniikan osaaminen ei riitä, vaan tarvitaan aika lailla myös rakennetekniikan osaamista. Oikosulkulaskelmat ovat näistä kaikkein vaikeimmin omaksuttavissa, sillä oikosulkuvirran aiheuttamat mekaaniset ja termiset vaikutukset saavat aikaan hyvin monimutkaisia dynaamisia ilmiöitä, kuten köysien heilahtelut ja tukirakenteiden värähtelyt. Asian tekee hankalaksi vielä se, ettei juuri mikään tekijä pysy vakiona oikosulun aikana vaan muuttuvat ajan funktiona ja vieläpä epälineaarisesti. Laskelmien yksinkertaistamiseksi niihin onkin jouduttu tekemään koko joukko likimääräisyyksiä, joissa ilmiöitä on linearisoitu ja joitakin merkityksettömmämpiä tekijöitä on jätetty kokonaan huomioimatta. Linearisoinnilla tarkoitetaan tässä sitä, että dynaamisia ilmiöitä kuvaavat osittaisdifferensiaaliryhtymät on korvattu lineaarisilla ns. kvasistaattisilla yhtälöillä.

Nämä laskelmiin tehty likimääräisyydet huonontavat jonkin verran laskelmien tarkkuutta. Toisaalta tarkkuuteen vaikuttavat myös lähtötietojen tarkkuudet ja luotettavuudet. Usein näissäkin joudutaan tekemään joitakin oletuksia ja likimääräisyyksiä. Nämä likimääräisyydet laskelmissa ja oletukset lähtötiedoissa on mitoituksen kannalta tehtävä aina varmemmalle puolelle. Tästä seuraa väistämättä se, että asennuksista tulee helposti jonkin verran ylimitoitettuja. Teknisessä mielessä tästä ei yleensä ole haittaa, mutta liiallinen ylimitoittaminen nostaa rakentamiskustannuksia ja voi näin heikentää yrityksen kilpailukykyä.

Yhteenvedona tästä kappaleesta voidaan todeta se, että mitä paremmin ilmiöihin liittyvät teoriat tunnetaan, sitä tarkemmat ja luotettavammat mitoituslaskelmat on mahdollista tehdä. Teorian tuntemus korostuu varsinkin uusien laskentaohjelmien suunnittelussa (ks. luku 4.2).

#### 4.1.3 Miten laskelmat nykyisellään tehdään?

Ei ole niin kauhean pitkä aika siitä, kun kaikki laskelmat tehtiin vielä käsin paperille taskulaskimia apuna käyttäen. Toimiihan tämä menetelmä hyvin vielä nykyäänkin yksinkertaisissa tapauksissa, mutta monimutkaisemmat ja varsinkin usein toistuvat laskelmat tehdään jo pääasiassa tietokoneen avustuksella. Sen käyttöä on omalta osaltaan lisännyt vaatimus sähköisestä arkistoinnista.

ABB Oy Sähköasemat -yksikkö käyttää sähköaseman ensiöpuolen laskelmien tekemiseen tänä päivänä pääasiassa Excel-taulukkolaskentaohjelmaa. Jonkin verran laskelmia tehdään myös Mathcad-ohjelmalla. Varsinaisia kaupallisia laskentasovellutuksia ei ole tällä hetkellä käytössä, vaan laskentaohjelmat ja -pohjat ovat suunnittelijoiden itsensä tekemiä.

Excelin dominanssiin laskelmien tekemisessä on vaikuttanut se, että ko. ohjelma löytyy tänä päivänä vakiona jokaisen suunnittelijan työasemasta, kun taas Mathcad on vain harvoilla käytössä. Excelin käyttö koetaan myös helpompana ja joustavampana, joten kynnys sen käyttöön on ollut matalammalla Mathcadiin verrattuna. Mathcadin etuna on pidetty sitä, että siinä laskentakaavat tulevat selkeästi näkyviin, joten laskelman tulostus on kelvannut yleensä sellaisenaan asiakkaalle lähetettävänä raporttina. Excelissä näin ei ole, koska siinä varsinaiset laskelmat jäävät piiloon. Jotta Excelillä tehtyjen laskelmien raporteista saadaan luettavia, kaavat joudutaan lisäämään niihin erikseen tekstimuodossa tai kaavaobjekteina kaavaeditorin avulla.

Laskelmien hyväksyjälle, eli yleensä asiakkaalle, Mathcadilla tehtyt laskelmat ovat tämän kaavojen esitystavan vuoksi helpompia tarkastaa; raportteja on helppo seurata, koska niistä näkee tarkkaan, kuinka laskelmat on tehty. Vaikka Exceliin saadaankin kaavat kirjoitettua näkyviin, saattavat ne kuitenkin poiketa varsinaisista, ohjelman käyttämistä kaavoista (esim. virheen seurauksena). Tämä voi tehdä laskelman tarkastamisen työlääksi varsinkin, jos kaavat ovat kovin monimutkaisia.

Laskelmat tehdään pääosin itse, lukuun ottamatta teräsrakenne- ja perustuslaskelmia, jotka teetetään yleensä talon ulkopuolella kuten myös niihin liittyvät rakenne-suunnitelmatkin. On katsottu, että näiden osuus suhteessa muuhun suunnitteluun on sen verran vähäistä, ettei sitä varten kannata ylläpitää omia resursseja. Tämä on lisäksi sellainen osuus, joka on suhteellisen helppo ulkoistaa, eli suunnittelun rajapinta on kohtuullisen selkeä.

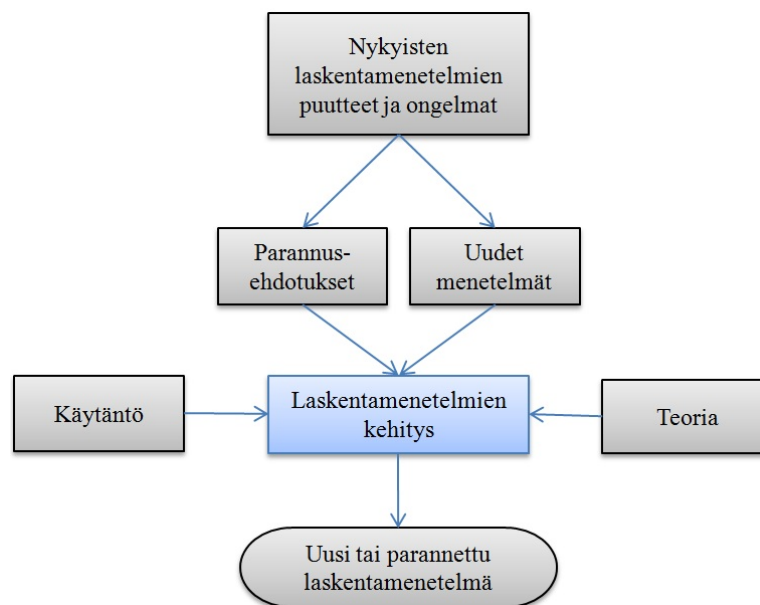
Laskelmien kielenä on poikkeuksetta käytetty englantia, koska suurin osa projekteista tehdään ulkomaille ja englanninkieliset laskelmat kelpaavat yleensä suomalaisillekin asiakkaille.

Myös muut sähköasemamarkkinoilla toimivat yritykset ovat kehittäneet omia lasken-

tamenetelmiä, joissa usein on myös Excel perustana [18]. Monet ulkomaiset ABB:n yhtiöt käyttävät Saksan ABB:n kehittämää ohjelmaa nimeltä Kurwin. Tämä ohjelma mainitaan myös ABB Switchgear Manual -käsikirjassa [8, s. 141]. Ruotsin ABB käyttää taas omien ohjelmien lisäksi mm. GT Data -yrityksen valmistamia ohjelmia. Näihin ohjelmiin palataan myöhemmin luvussa 4.1.5.

#### 4.1.4 Miten nykyisiä laskentamenetelmiä voitaisiin kehittää?

Laskentamenetelmien kehitystä voidaan mallintaa kuvassa 28 esitetyn kaavion avulla. Kehitystyön lähtökohdaksi voidaan ottaa nykyisten laskentamenetelmien puutteet ja ongelmat. Näiden pohjalta syntyvät ideat niin vanhojen menetelmien parantamiseksi kuin kokonaan uusien menetelmien kehittämiseksi. Kun tähän lisätään vielä käytännöstä hankittu tieto ja laskelmiin liittyvien teorioiden hallinta, syntyy käsitys hyvästä laskentamenetelmästä ja kehitystyö voi alkaa. Tämän kehitystyön tuloksena syntyy joko parannettu versio vanhasta laskentamenetelmästä tai kokonaan uusi laskentamenetelmä.



Kuva 28: Laskentamenetelmien kehitys.

Nykyiset ABB Oy Sähköasemat -yksikön nykyisin käyttämät Excel ja Mathcad -laskentapohjat tuntuvat toimivilta, eikä niissä sen suhteen ole sellaisia puutteita tai ongelmia, jotka vaatisivat välittömiä korjauksia – parannettavaa kylläkin. Tässä ei kuitenkaan lähdetä luettelemaan kuhunkin laskentapohjaan liittyviä yksittäisiä parannusehdotuksia, vaan esitetään yleisesti, edellisen kappaleeseen nojaten käsitys hyvältä laskentamenetelmältä vaadittavista ominaisuuksista:

1. Luotettavuus. Tämä on laskentamenetelmän ehdottomasti se tärkein ominaisuus, eli on voitava luottaa sen antamiin tuloksiin. Luotettavuuden varmistamiseksi sitä on testattava riittävästi ja verrattava sen antamia laskentatuloksia jollakin toisella menetelmällä (esim. käsin laskemalla) saatuihin tuloksiin.
2. Helppokäyttöisyys. Lähtötietojen syötön on oltava yksiselitteistä ja opastavaa, eikä niissä saa esiintyä sellaista tietoa, joka on laskettavissa tai johdettavissa muista lähtötiedoista. Menetelmän tulee edetä loogisesti lähtötietojen syötöstä tulosten raportointiin. Tulosten raportoinnin tulee olla selkeä ja yksiselitteinen. Käyttöohjeiden tulee olla riittäviä ja helposti ymmärrettäviä.
3. Turvallisuus. Menetelmän on oltava sellainen, että käyttäjä ei voi vahingossa muuttaa sen toimintaa. Tämä voidaan hoitaa esim. riittävän kirjoitussuojauksen avulla.
4. Päivitettävyys. Menetelmän on oltava sellainen, että sen päivitettävyys on helppoa ja turvallista. Päivityksestä tulee tarvittaessa laatia oma ohje, tai se voi olla osana käyttöohjeita.
5. Nopeus. Menetelmän tulee olla nopea, jotta laskelman tulokset saadaan näkyviin välittömästi lähtöarvoa muutettaessa.

Näiden ominaisuuksien lisäksi on laskentaohjelmasta tulostettavan raportin ulkoasuun kiinnitettävä erityistä huomiota, koska tämä raportti voidaan lähettää asiakkaalle hyväksyttäväksi. Hyväksyttämistä varten raportista on tällöin käytävä selville, miten laskelma on tehty. Tietysti on tärkeintä, että tulokset ovat siinä oikein, mutta tämän lisäksi sen tulisi myös näyttää hyvältä ja näin herättää luottamusta lukijassa.

#### 4.1.5 Mitä valmiita laskentasovellutuksia markkinoilta löytyy?

Tähän kysymykseen on etsitty vastausta Internetistä Googlen hakukonetta käyttäen. Hakutuloksiin kelpuutettiin vain englanninkieliset ja Windows ympäristössä toimivat laskentasovellutukset.

Seuraavassa on lueteltu joitakin Internetistä löytyneitä, potentiaalisia sovellutuksia sekä arviota niiden sopivuudesta ABB Oy Sähköasemat -yksikön käyttöön:

1. Osoitteessa [http://filedb.experts-exchange.com/incoming/2008/02\\_w09/7019/123.xls](http://filedb.experts-exchange.com/incoming/2008/02_w09/7019/123.xls) on Excel-laskentapohja, jossa on köysiin liittyvät laskelmat: riippuma ja kireys, oikosulkuvoimat tukirakenteiden ja perustusten mitoittamista varten. Laskentapohja on siistin näköinen, mutta sen luotettavuudesta ei ole mitään takeita eikä tekijästäkään löydy mitään tietoja. Laskentapohjaa ei näin ollen voi käyttää muuten kuin informatiivisena aineistona. Laskentapohja on maksuton.

2. Osoitteesta <http://www.sag10.com/> löytyy Southwire SAG10 -laskentaohjelma, joka on tehty köysien riippuman ja kireyden laskentaa varten. Se on suunniteltu lähinnä USA:n markkinoille, mutta siinä on myös SI-yksiköt mahdollista valita käyttöön. Ohjelma on tehty lähinnä avojohdoille ja on sen vuoksi ehkä tarpeettoman laaja vain sähköasemaympäristöön. Kun vielä ottaa huomioon sen suhteellisen korkean hinnan, ei sen hankintaa pelkästään sähköaseman suunnittelua varten voida oikein pitää perusteltuna.
3. Osoitteesta [http://www.neplan.ch/html/e/e\\_home.htm](http://www.neplan.ch/html/e/e_home.htm) löytyy NEPLAN -laskentaohjelma, johon on saatavissa moduuli maadoitusjärjestelmän analysointia varten. Tämä ohjelmamoduuli ottaa huomioon sekä CENELEC:n että IEEE:n standardien vaatimukset. Se soveltuisi hyvin ABB Oy Sähköasemat -yksikön käyttöön täydentämään nykyistä Mathcad-pohjaista laskentamenetelmää varsinkin, kun heillä on NEPLAN jo entuudestaan käytössä mm. oikosulkuvirtojen laskentaa varten.
4. Osoitteesta <http://www.sestech.com/default.htm> löytyy ohjelmia maadoitusjärjestelmän laskentaan ja analysointiin. Ne vastaavat ominaisuuksiltaan hyvin paljon edellisessä kohdassa mainittua NEPLAN -ohjelmamoduulia.
5. Osoitteesta <http://www.etap.com/> löytyy ETAP -ohjelma, johon on saatavissa moduulit maadoitusjärjestelmän laskentaan sekä köysien riippuman ja kiristyksen laskentaan. Näiltä osin ne vastaavat edellä mainittuja NEPLAN ja SAG10 -ohjelmia.
6. Osoitteesta <http://www.edsa.com/designbase/main.php> löytyy ohjelma EDSA Paladin DesignBase, joka vastaa ominaisuuksiltaan em. ETAP-ohjelmaa.
7. Osoitteesta <http://www.datakustik.com/en/navitop/home/> löytyy ohjelma Cadna A melun laskentaan. Melun laskennan tarpeellisuus sähköasemilla on kuitenkin niin olematonta, ettei sitä varten kannata hankkia omaa ohjelmaa.

Näiden hakutulosten lisäksi Internetistä löytyi joitakin viittauksia tuohon luvussa 4.1.3 mainittuun Kurwin-ohjelmaan, joka esiintyy ABB Switchgear Manual -käsikirjan sivuilla [8, s. 141]. Internetistä ei kuitenkaan onnistuttu löytämään mitään varsinaista tietoa tästä ohjelmasta, kuten ominaisuuksista, hinnasta, jne. Koska ohjelmaa ei markkinoida Internetissä, tästä voi vetää sen johtopäätöksen, että se on tarkoitettu vain ABB:n sisäiseen käyttöön. ABB Oy Sähköasemat -yksiköllä olisi tämän perusteella mahdollisuus saada tuo ohjelma hankittua itselleen niin halutessaan, mutta tässä sitä asiaa ei kuitenkaan lähdetä selvittämään tämän pidemmälle.

Kun Internet-hakua ulotettiin myös ruotsinkielisille sivuille, löytyi osoitteesta <http://home.swipnet.se/tillas/gtdata/> suuri joukko GT Data -nimisen yrityksen tekemiä laskentaohjelmia, joita mm. Ruotsin ABB käyttää suunnittelussaan. Tutkimuksessa testattiin kahta näistä ohjelmista: IECTUBE ja IECFLEX, jotka liittyivät oikosulkuvirtojen mekaanisten vaikutusten laskentaan putkille ja köysille. Ohjelmien antamia tuloksia verrattiin luvun 4.2 laskentaohjelmien antamiin tuloksiin

ja ne olivat täsmälleen samoja. Tämän perusteella ohjelmia voidaan pitää luotettavina. Muutenkin ne todettiin hyviksi lukuun ottamatta ohjelmien päivitettävyyttä ja raporttien ulkoasua (ks. luku 4.1.4). Ohjelmien hinnat olivat myös kohtuullisia.

Näiden em. laskentaohjelmien lisäksi markkinoilta löytyi ns. FE (Finite-Element) -ohjelmia, kuten ABAQUS, joilla pystytään laskemaan periaatteessa mitä tahansa fyysikaalisia ilmiöitä. Tällä ABAQUS-ohjelmalla on lähdekirjallisuudessa laskettu mm. oikosulkuvirran aiheuttamia köysivoimia [20]. Laskentaa varten kohde on ensin mallinnettava kolmiulotteisesti ja diskretoitava sen jälkeen pieniin elementteihin (FE). Kohteesta voidaan tehdä joko dynaaminen tai staattinen malli riippuen laskelmalta vaadittavasta tarkkuudesta ja laskentanopeudesta [21]. Nämä ohjelmat ovat kuitenkin liian monimutkaisia ja aikaa vieviä, jotta niitä voitaisiin käyttää sähköasemien jokapäiväisessä suunnittelussa ja ovat näin ollen paremminkin tuotekehitykseen sopivia apuvälineitä. Samaan toteamukseen päätyi myös Petri Koski omassa diplomityössään [18].

Yhteenvetona tästä kappaleesta voidaan todeta, että oikosulkuvirtojen termisten ja mekaanisten vaikutuksen laskentaan ei markkinoilta löytynyt yhtään sellaista sovelutusta, joka olisi täyttänyt kaikki hyvälle laskentaohjelmalle asetetut vaatimukset (ks. luku 4.1.4). Jos näistä vaatimuksista hiukan tinkii, voi GT Data -yrityksen ohjelmia pitää hintaansa ja laatuunsa nähden hyvinä hankintoina. Köysien riippuman ja kiristyksen laskentaan soveltuvia ohjelmia löytyi useita, mutta ne olivat puolestaan liian laajoja (ja kalliita) pelkästään sähköaseman köysien laskentaa varten. Maadoitusjärjestelmien laskentaan löytyi myös useita vaihtoehtoja, joista ABB Oy Sähköasemat -yksikön kannattaisi hankkia itselleen tuo NEPLAN:n maadoitusjärjestelmän analysointiin tehty ohjelmamoduuli. Lisäksi heidän kannattaisi selvittää hiukan paremmin tuon Kurwin-ohjelman tilanne: saatavuus, hinta ja ominaisuudet.

## 4.2 Laskentaohjelman suunnittelu

Tämän tutkimuksen yhtenä tehtävänä oli suunnitella tietokoneohjelma oikosulkuvirran mekaanisten ja termisten vaikutusten laskemiseksi. Sen tarkoituksena oli soveltaa em. tutkimuskysymyksissä selviteltyjä asioita käytäntöön ja tavoitteena oli saada aikaan sellainen ohjelma, jolla nykyisin käytössä olevat laskentapohjat voitaisiin korvata ja joka mahdollisimman hyvin täyttäisi luvussa 4.1.4 esitetyt vaatimukset hyvälle laskentamenetelmälle.

Tietokoneohjelmalta vaadittiin, että siinä käytetyt laskentamenetelmät noudattavat tarkoin IEC 60865 -standardia ja että se kattaa normaalit ulkokytkinlaitoksella esiintyvät johdinjärjestelmät eli putkikiskot ja köydet. Lisäksi vaadittiin, että ohjelma perustuu Excel-taulukkolaskentaohjelmaan ja sen kielenä on englanti.



Näiden vaatimusten pohjalta syntyi taulukon 1 mukaiset Excel-laskentaohjelmat, jotka seuraavat IEC 60865-2 -standardissa [19] olevia laskentaesimerkkejä.

Taulukko 1: Excel-laskentaohjelmat oikosulkuvirran mekaanisten ja termisten vaikutusten laskentaan.

<b>CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENT EFFECTS IN OPEN AIR HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS</b>		
Mechanical effects on arrangement with rigid tubular conductors (according to IEC 60865-2, example 3)	Mechanical effects on arrangement with flexible conductors (according to IEC 60865-2, example 4 and 5)	Thermal effect on bare conductors  (according to IEC 60865-2, example 6)
IEC865_mrt.xlsm	IEC865_mfc.xlsm	IEC865_tbc.xlsm

Nämä ohjelmat noudattavat kaikki samaa formaattia, eli ne muistuttavat toisiaan niin ulkonäöltään kuin toiminnallisuudeltaankin. Ne koostuvat Excel-sivuista sekä Visual Basic -makroista. Sivut muodostuvat itse laskelmasivusta sekä siihen linkitetystä apusivuista. Apusivuilla ovat käyttöohjeet, tietokannat sekä laskelmien tarvitsemat taulukot ja käyrästöt.

Laskelmasivun rakenne ja samalla niistä saatava raportti noudattaa seuraavaa järjestystä:

1. Projektitiedot
2. Laskelman lähtöarvot
3. Laskelma
4. Tulokset ja johtopäätökset

Nämä kustakin ohjelmasta saatavat raportit eli tulosteet on esitetty liitteessä B. Näissä raporteissa laskelmat on tehty samoilla lähtöarvoilla kuin mitä IEC 60865-2 -standardin esimerkitkin. Tulosteiden oikeassa reunassa, suluissa olevien kaavojen numerot tulevat myös suoraan ko. standardista.

Ne taulukon solut, joihin käyttäjällä on kirjoitusoikeus, eli projektitiedot ja lähtöarvot, näkyvät värillisinä. Muut solut on kirjoitussuojattu, joten käyttäjällä ei ole mahdollisuutta vahingoittaa tai muuttaa ohjelman toimintaa tahattomasti.

Seuraavissa luvuissa kerrotaan tarkemmin kunkin ohjelman sisällöstä ja ominaisuuksista. Valitettavasti näissä luvuissa esiintyy jonkin verran englanninkielisiä sanoja

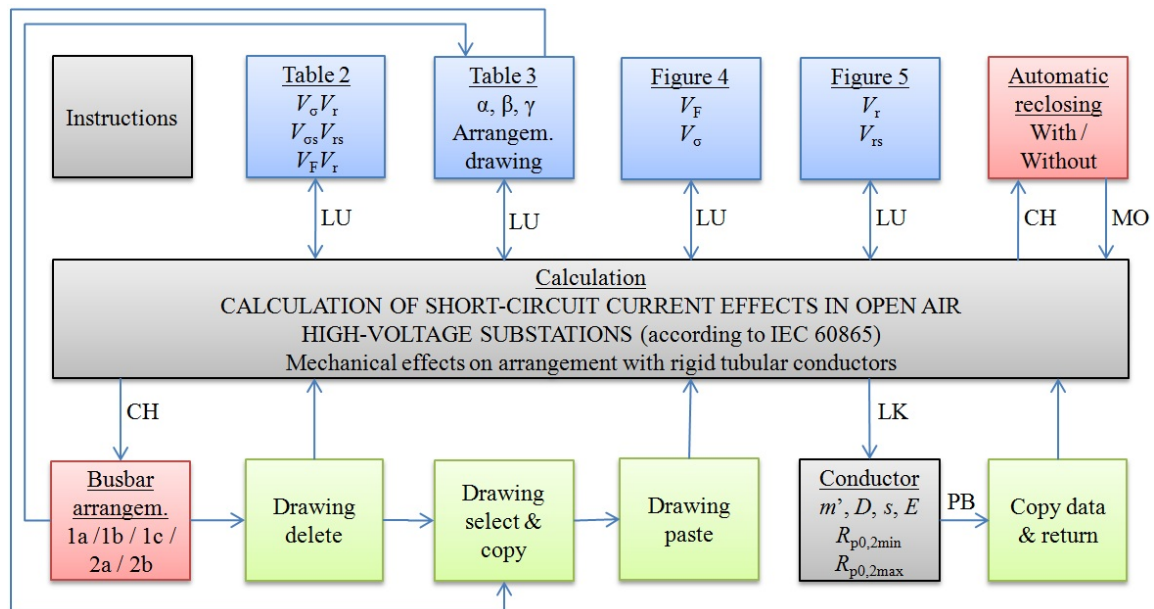
johtuen siitä, että ohjelmien kielenä tuli nimenomaan käyttää englantia. Ohjelmien rakennetta esittäviä kuvia on luvuissa havainnollistettu väreillä, joiden merkitys selviää alla olevasta taulukosta 2.

Taulukko 2: Värien käyttö ohjelmien rakennetta esittävissä kuvissa.

Väri	Merkitys
Harmaa	Excel-sivu, joka näkyy käyttäjälle.
Sininen	Excel-sivu, joka on piilotettu käyttäjältä.
Punainen	Makro, joka käynnistyy taulukossa olevan solun muutoksesta.
Vihreä	Makro, joka käynnistetään muista makroista tai painonapista.

#### 4.2.1 IEC865\_mrt.xlsm - mekaaniset vaikutukset putkille

Ohjelma rakentuu kuvan 29 mukaisesti. Sen ytimenä on itse laskelmasivu (Calculation) ja sen ympärillä ovat laskelmaa tukevat apusivut ja makrot. Sinisellä värillä merkittyjen apusivujen nimet ja sisällöt tulevat suoraan IEC 60865-1 -standardista [9]. Näillä apusivuilla olevia kertoimia ei kuitenkaan tarvitse itse lukea taulukoista ja käyrästöistä, vaan ohjelma tekee sen automaattisesti käyttäen Excelin Lookup-funktiota. Sen vuoksi ko. taulukot ja käyrästöt onkin piilotettu käyttäjältä.



Kuva 29: IEC865\_mrt.xlsm ohjelman rakenne. LU = Lookup, MO = Modify, LK = Link, CH = Change, PB = Push button.

Ohjelmassa esiintyy kaksi taulukon solun muutoksesta käynnistyvää makroa, joista toinen on kiskojärjestelmän (Busbar arrangement) ja toinen jälleenkytkennän (Automatic reclosing) valintaa varten. Kiskojärjestelmän valintaa muutettaessa edellinen kuva ensin poistetaan (Drawing delete) laskelmasta. Sen jälkeen uusi kuva kopioidaan valitun kiskojärjestelmän mukaisesti taulukosta 3 (Drawing select & copy) ja liitetään laskelmaan (Drawing paste). Jälleenkytkentä voidaan valita, onko se laskelmassa mukana vai ei. Käytännössä laskelma tehdään kuitenkin aina ottaen myös jälleenkytkentä huomioon ja laskelmasta ainoastaan piilotetaan jälleenkytkentään liittyvä osuus, mikäli sitä ei haluta mukaan laskelmaan.

Ohjelmassa on omalla sivullaan (Conductor) tietokanta putkikiskoista teknisine tietoineen. Ohjelmassa on mahdollisuus syöttää tiedot laskelmaan joko käsin tai automaattisesti valitsemalla sopiva putki tietokannasta. Valinta tehdään merkitsemällä ensin valitun putken kohdalle x-kirjain ja painamalla sen jälkeen sarakkeen yläpuolella olevaa makro-painiketta (Copy data & return), jolloin valitun putken tekniset tiedot kopioituvat laskelmaan.

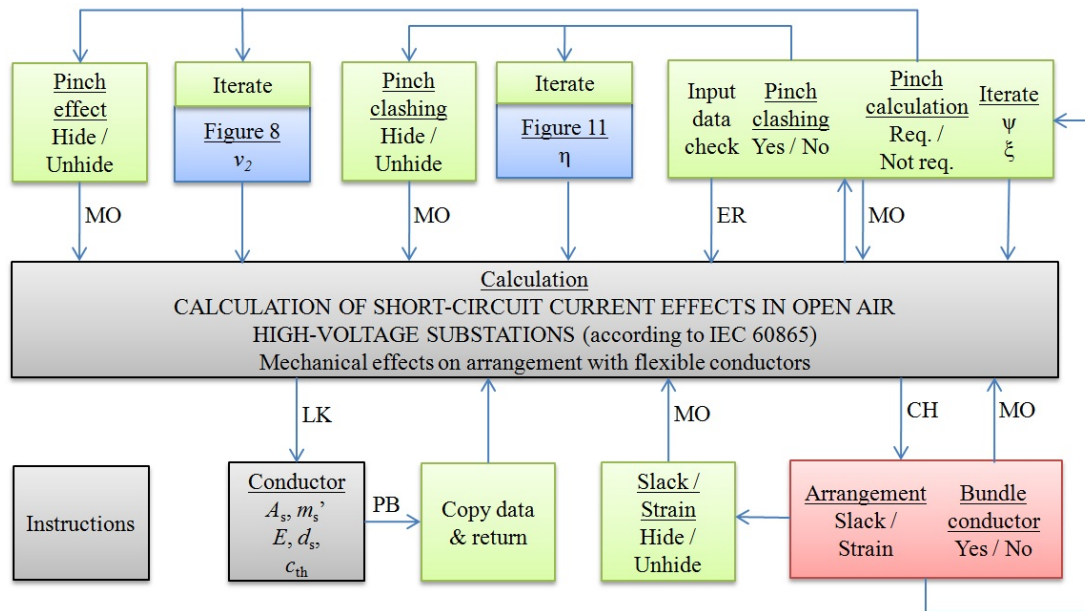
Laskelma noudattaa IEC 60865-2 -standardin [19] esimerkkiä 3 sillä poikkeuksella, että tukirakenteiden momentteja ei lasketa. Tämä on jätetty pois sen takia, ettei laskelma olisi riippuvainen tukirakenteiden muodosta. (Standardin mukainen laskelma olettaa, että tukirakenteet ovat vaihekohtaisia, mutta käytännössä teräsrakenne on useimmiten yhteinen kaikille kolmelle vaiheelle.) Momenttien laskeminen erikseen on sitä paitsi helppoa jälkeensä, kun rakenne on tiedossa. Tämä laskelma on muutenkin parempi sisällyttää tukirakenteita koskevaan laskelmaan luvun 2.10 mukaisesti.

Käyttöohjeissa (Instructions) kerrotaan ohjelman ominaisuuksista sekä neuvotaan lähtöarvojen syötössä, tulosten tulokinnassa ja tietokannan (Conductor) päivittämisessä.

#### 4.2.2 IEC865\_mfc.xlsm - mekaaniset vaikutukset köysille

Ohjelma rakentuu kuvan 30 mukaisesti. Sen ytimenä on itse laskelmasivu (Calculation) ja sen ympärillä ovat laskelmaa tukevat apusivut ja makrot. Sinisellä värillä merkittyjen apusivujen nimet ja sisällöt tulevat suoraan IEC 60865-1 -standardista [9]. Näillä apusivuilla olevia kertoimia ei kuitenkaan tarvitse itse lukea käyrästä, vaan ohjelma tekee sen automaattisesti makrojen ja funktioiden avulla. Sen vuoksi ko. käyrästöt onkin piilotettu käyttäjältä.

Ohjelmassa esiintyy kaksi taulukon solun muutoksesta käynnistyvää makroa, joista toinen on köysijärjestelmän (Arrangement) ja toinen nippuköyden (Bundle conductor) valintaa varten. Köysijärjestelmän valintaa muutettaessa edellinen järjestelmä-



Kuva 30: IEC865\_mfc.xlsm ohjelman rakenne. MO = Modify, LK = Link, CH = Change, PB = Push button, ER = Error.

kuva ensin piilotetaan laskelmasta ja sen jälkeen uusi kuva asetetaan näkyväksi valitun järjestelmän mukaisesti (Slack/Strain–Hide/Unhide). Samalla laskentapohjaa muutetaan vastaamaan uutta valintaa ja päivitetään laskelma. Kun osajohdinten lukumääräksi asetetaan yksi (Bundle = No), poistetaan laskelmasta nippuköyttä koskevat lähtötiedot. Samalla laskentapohjaa muutetaan vastaavasti ja päivitetään laskelma. Kun taas lukumääräksi asetetaan kaksi tai sitä suurempi arvo (Bundle = Yes), muutetaan laskelma nippuköyttä vastaavaksi.

Laskelma toimii pääasiassa laskelmasivulla olevien kaavojensa avulla, mutta jotakin kertoimia ei saada suoraan kaavasta tai taulukosta vaan ne on ratkaistava numeerisesti iteroimalla. Tämä tehdään kertoimien  $\psi$  ja  $\zeta$  osalta Excelin Goal seek -funktion avulla ja kertoimien  $\nu_2$  ja  $\eta$  osalta makroilla omilla apusivuillaan. Kertoimen  $\nu_2$  ratkaisussa käytetään sekanttimenetelmää ja kertoimen  $\eta$  ratkaisussa Newtonin menetelmää. Jotta ohjelma ei kaatuisi iteroinnissa, ohjelmaan on lisätty makro (Input check), joka tarkistaa tietyt kriittiset lähtöarvot, ennen kuin se jatkaa eteenpäin. Virheellisestä lähtöarvosta tulee ilmoitus käyttäjälle.

Laskentasisiä muokataan makroilla vielä sen mukaan, tarvitaanko supistusvaikutuksen laskentaa (Pinch calculation), ja jos tarvitaan, niin onko mahdollinen supistusvaikutus sellainen, että köydet koskettavat siinä toisiaan (Pinch clashing). Tämä seikka vaikuttaa myös em. kertoimien  $\nu_2$  ja  $\eta$  iterointiin.

Ohjelmassa on omalla sivullaan (Conductor) tietokanta köysistä teknisine tietoineen. Ohjelmassa on mahdollisuus syöttää tiedot laskelmaan joko käsin tai automaatti-

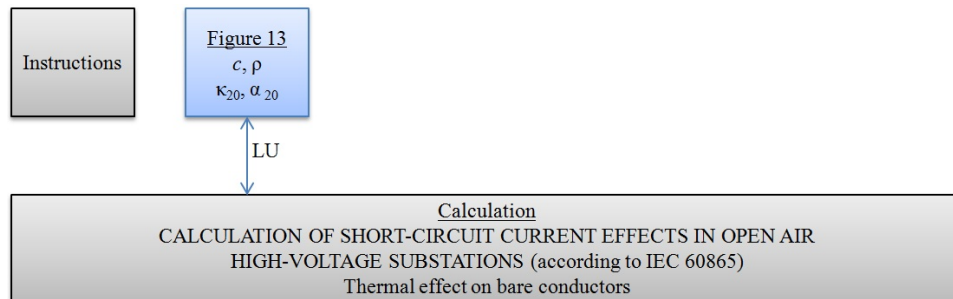
sesti valitsemalla sopiva köysi tietokannasta. Valinta tehdään merkitsemällä ensin valitun köyden kohdalle x-kirjain ja painamalla sen jälkeen sarakkeen yläpuolella olevaa makro-painiketta (Copy data & return), jolloin valitun köyden tekniset tiedot kopioituvat laskelmaan.

Laskelma noudattaa IEC 60865-2 -standardin [19] esimerkkejä 4 ja 5 sillä poikkeuksella, että lämpötilaa kuvaava alaindeksi  $-20^{\circ}\text{C}$  on korvattu alaindeksillä f (freezing) ja alaindeksi  $60^{\circ}\text{C}$  on korvattu alaindeksillä h (hot): tämä sen takia, ettei suuria kuvaavista lyhenteistä tulisi liian pitkiä.

Käyttöohjeissa (Instructions) kerrotaan ohjelman ominaisuuksista sekä neuvotaan lähtöarvojen syötössä, tulosten tulkinnassa ja tietokannan (Conductor) päivittämisessä.

#### 4.2.3 IEC865\_tbc.xlsm - termiset vaikutukset paljaille johtimille

Ohjelma rakentuu kuvan 31 mukaisesti. Sen ytimenä on itse laskelmasivu (Calculation) ja sen ympärillä ovat laskelmaa tukevat apusivut. Sinisellä värillä merkityn apusivun nimi ja sisältö tulee suoraan IEC 60865-1 -standardista [9]. Tällä apusivulla olevia kertoimia ei kuitenkaan tarvitse itse lukea taulukosta tai käyrästä, vaan ohjelma tekee sen automaattisesti käyttäen Excelin Lookup-funktiota. Sen vuoksi ko. apusivu onkin piilotettu käyttäjältä.



Kuva 31: IEC865\_tbc.xlsm ohjelman rakenne. LU = Lookup.

Laskelma noudattaa IEC 60865-2 -standardin [19] esimerkkiä 6 sillä lisäyksellä, että kerroin  $n$  lasketaan keskiarvona välillä  $1 < I_k''/I_k < 1,25$ , koska standardissa tätä ei ole määritelty. Tämä määrittely tarvitaan kuitenkin laskentaohjelman toimivuuden parantamiseksi.

#### 4.2.4 Testaus

Ohjelmien testauksessa on käytetty hyväksi luvussa 4.1.4 esitettyjä vaatimuksia hyväälle laskentaohjelmalle.

1. Luotettavuus. Kaikki ohjelmat on testattu vertaamalla niistä saatuja tuloksia IEC 60865-2 -standardin [19] laskentaesimerkkien tuloksiin. Näissä esiintyy pieniä eroja johtuen standardissa tehdyistä lukuarvojen pyöristyksistä. Erot ovat kuitenkin mitoituksen kannalta merkityksettömiä. Lisäksi saatuja tuloksia on verrattu ABB Switchgear Manual -käsikirjan laskentaesimerkin [8, s. 141] tuloksiin sekä GT Data -yrityksen IECTUBE ja IECFLEX -ohjelmien (ks. luku 4.1.5) antamiin tuloksiin. Kaikki vertailut osoittavat, että ohjelmista saatuihin tuloksiin voidaan luottaa.
2. Helppokäyttöisyys. Lähtötietojen syöttö on yksiselitteistä, koska niiden syöttöruudut on selvästi merkitty värillä. Lähtötietojen syöttö on helppoa ja opastavaa syöttöruutuihin sijoitettujen alasvetovalikoiden, opasteiden sekä rajoitusten ansiosta. Lisäksi putkien ja köysien lähtöarvojen syötössä voidaan käyttää apuna ohjelmiin liitettyjä tietokantoja. Ohjelmissa ei myöskään esiinny sellaisia lähtöarvoja, jotka voitaisiin laskea muista lähtöarvoista. Tämä tarkoittaa mm. sitä, että standardin taulukoiden ja käyrästöjen mukaisia kertoimia ei tarvitse antaa lähtötietoina vaan ohjelma laskee ne itse. Ohjelmat etenevät loogisesti lähtötietojen syötöstä laskelman kautta lopputuloksiin ja -päätelmiin standardin esimerkkejä noudattaen. Laskentatulokset eli raportit ovat selkeitä ja ne esittävät kaikki laskelmissa käytetyt kaavat standardin mukaisin kaavanumeroin. Jokaiseen ohjelmaan on liitetty oleellimmat ohjeet niiden käytöstä.
3. Turvallisuus. Käyttäjä ei voi vahingossa muuttaa ohjelman toimintaa tahattomasti, koska muut kuin lähtötietojen syöttöruudut ovat kirjoitussuojattuja.
4. Päivitettävyys. Ohjelmissa olevien tietokantojen päivittäminen on helppoa käyttöohjeita noudattamalla. Varsinaisen laskelman päivittäminen, esimerkiksi standardeissa tapahtuneen muutoksen johdosta, edellyttää käyttäjältä kuitenkin Visual Basic -ohjelman osaamista.
5. Nopeus. Ohjelman tulokset tulevat näkyviin välittömästi lähtöarvoa muutettaessa.

Ohjelmien helppokäyttöisyyttä ja päivitettävyyttä lisää vielä se, että ne on tehty Excelillä, eli ohjelmalla, joka on suurimmalle osalle tuttu.

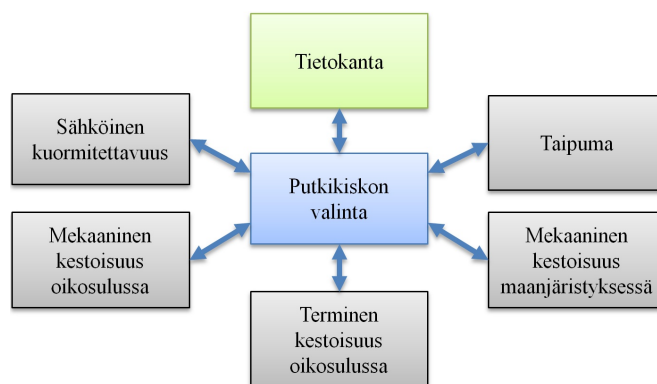
Vaikka ohjelmissa on painotettu niiden helppokäyttöisyyttä, se ei kuitenkaan poista sitä tosi asiaa, että käyttäjän on myös itse oltava perillä siitä, mitä on tekemässä, eli tunnettava laskelmiin liittyvät teoriat riittävällä tasolla.

#### 4.2.5 Jatkokehitys

Ohjelmiin liitetty tietokannat ovat tällä hetkellä hyvin suppeita ja niitä tulisikin jatkossa täydentää. Tämä kävisi helpoiten, jos köysien ja putkien valmistajilta saataisiin niihin liittyvät tekniset tiedot valmiiksi Excel-muodossa. Silloin ne olisi helppo kopioida suoraan tietokantoihin, jolloin syöttövirheidenkin määrä vähentäisi.

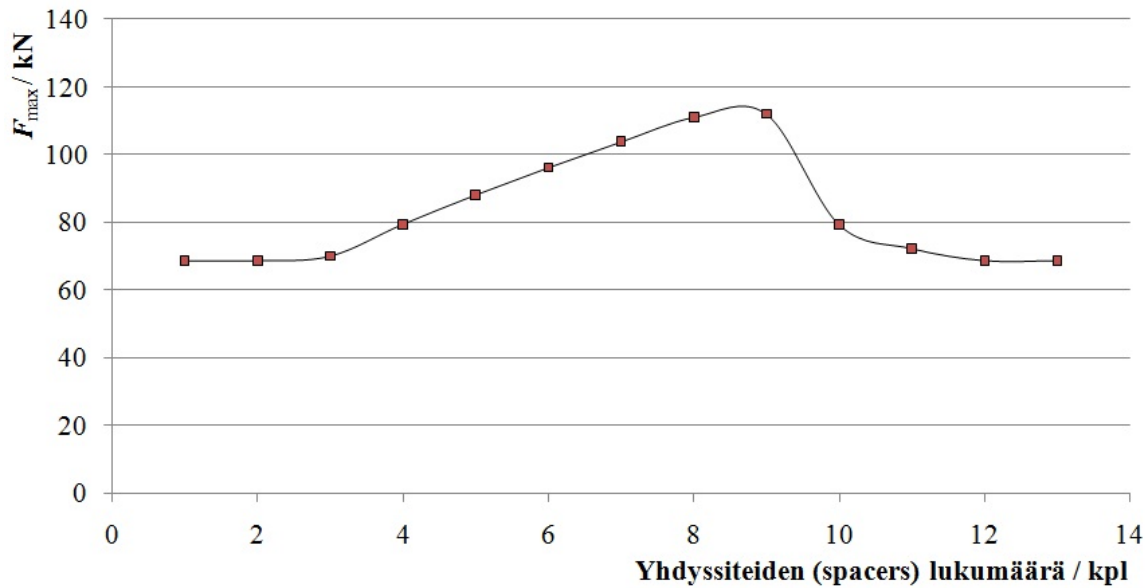
Ohjelmaan IEC865\_mrt.xlsm voisi vielä lisätä painonapin ja sille makron, jolla saisi putken rasituksen ja tukieristimen voiman ylärajaan liittyvät laskelmat piilotettua. Näitähän ei laskelmassa välttämättä tarvita ja saattavat vain aiheuttaa käyttäjässä hämmennystä (ks. luku 2.3.3).

Mikäli tehdyt ohjelmat saavat hyvän vastaanoton käyttäjien keskuudessa, voitaisiin niiden määrää kasvattaa kattamaan muutkin tässä tutkimuksessa käsitellyt laskelmat. Kun nämä ohjelmat tehtäisiin Excelillä, ne olisi helppo saada kommunikoimaan keskenään linkkien ja makrojen avulla ja näin mahdollistaa suurempien laskentakokonaisuuksien rakentelu. Esimerkkinä tästä voisi olla kokonaisvaltainen laskentaohjelma putkikiskon valintaan kuvan 32 mukaisesti, jossa voisi olla myös taloudelliset näkökohdat otettuna huomion. Esimerkissä jokainen harmaalla esitetty laatikko edustaa itsenäistä laskentamoduulia, jotka kommunikoivat sinisellä merkityn päämoduulin kanssa. Lähtöarvojen syöttö laskentamoduuleille tapahtuu päämoduulista, jonne myös laskentamoduulien tulokset palautuvat. Päämoduuliin voi olla lisäksi liitettyä tietokanta, josta sopiva putki voidaan valita. Sitten kun valintaan ollaan tyytyväisiä ja se täyttää kaikki tekniset ja taloudelliset kriteerit, voidaan siihen liittyvät raportit tulostaa kustakin moduulista erikseen.



Kuva 32: Putkikiskon valintaohjelma.

Excelissä voidaan myös helposti tutkia esim. lähtöarvon muutoksen vaikutusta laskentatulokseen sopivan makron ja käyrästön avulla, eli tehdä ns. herkkyytstarkastelu. Tästä esimerkkinä kuva 33, jossa on tutkittu yhdyssiteiden lukumäärän vaikutusta maksimi köysivoimaan jollakin jännevälillä. Kun laskelmaan lisätään myös taloudelliset näkökohdat, voidaan tätä menetelmää käyttää myös optimointiin, jossa haetaan edullisinta teknistä ratkaisua.



Kuva 33: Yhdyssiteiden lukumäärän vaikutus maksimi köysivoimaan,  $F_{\max} = f(n_s)$ , liitteen B mukaisessa laskelmassa IEC865\_mfc.xlsm (b).

Excelillä voidaan todella kätevästi tehdä mitä tahansa laskentaa ja se sopi erinomaisesti myös tässä tutkimuksessa tehtyihin ohjelmiin. Excelin käyttö on helppoa jo perustiedoillakin, mutta Visual Basic -ohjelman avulla sen mahdollisuudet ovat lähes rajattomat. Ainoa asia missä se häviää esimerkiksi Mathcadille, on kaavojen esitystapa. Tämä puute voidaan kuitenkin helposti korjata kirjoittamalla kaavat näkyviin kaavaeditoria apuna käyttäen, kuten liitteen B tulosteistakin käy selville.



## 5 Yhteenveto

Sähköasemamarkkinat ovat tänä päivänä kovan kilpailun alaisena niin kotimaassa kuin ulkomaillakin. Uusina kilpailijoina kansainvälisille markkinoille ovat nousseet mm. Kiina ja Intia, joissa palkkataso on Suomen verrattuna huomattavasti alempi. Säilyäkseen mukana tässä kiristyneessä kilpailussa yritysten on tehostettava toimintaansa jatkuvasti. Koska palkkoja ei yleensä voida alentaa, on samaan työhön käytettävää aikaa vähennettävä ja samalla löydettävä uusia, edullisempia teknisiä ratkaisuja. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi tarvitaan mm. tehokkaita suunnittelu- ja laskentamenetelmä, joiden avulla työt voidaan tehdä nopeammin ja laadukkaammin. Ne helpottavat myös uusien teknisten ratkaisujen löytämisessä ja käyttöönotossa.

Nämä suunnittelu- ja laskentamenetelmät eivät kuitenkaan ole vielä loppuun asti kehitettyjä, vaan sillä saralla riittää vielä töitä. Suunnittelumenetelmissä ollaan pikku hiljaa siirtymässä 2D-suunnittelusta 3D-suunnitteluun ja tämän myötä FEM-laskentamenetelmätkin (ks. luku 4.1.5) voivat saada enemmän jalansijaa tulevaisuudessa. Siihen asti toimitaan kuitenkin vielä ”perinteisillä” laskentamenetelmillä, jotka usein perustuvat tässäkin tutkimuksessa käytettyyn Excel-taulukkolaskentaohjelmaan.

Tältä pohjalta valittiin tämän tutkimuksen kohteeksi näiden laskentamenetelmien kehittäminen ja niistä ne laskelmat, jotka liittyvät sähköaseman, tai tarkemmin määriteltynä ulkokytkinlaitoksen, ensiöpuolen suunnitteluun.

Tutkimuksen alussa selvitettiin ensin SFS 6001 -standardin avulla, mitä laskelmia sähköaseman ensiöpuolen suunnittelussa ylipäättään tarvitaan ja miksi. Sen jälkeen perehdyttiin näiden laskelmien teoreettisiin taustoihin viitteissä mainittujen lähteiden avulla. Tärkeimpinä näissä olivat IEC:n standardit ja CIGRÉ:n julkaisut. Tämän teoriaosuuden jälkeen lähdettiin kentälle selvittämään, miten näitä laskelmia käytännössä tehdään. Tämä käytännön selvitystyö tehtiin etupäässä ABB Oy Sähköasemat -yksikössä. Samalla kartoitettiin, mitä puutteita nykyisissä laskentamenetelmissä on, miten niitä voitaisiin kehittää ja mitä uusia laskentamenetelmiä vielä tarvittaisiin. Tämän kartoituksen tuloksena syntyi mm. luettelo ominaisuuksista, joita hyvältä laskentaohjelmalta vaaditaan.

Koska ABB Oy Sähköasemat kaltaisen yrityksen ei kannata lähteä tekemään kaikkia laskentaohjelmia itse, niin lisäksi selvitettiin, mitä vapailla markkinoilla on tarjottavanaan: eli löytyisikö sieltä hyviä ja kohtuuhintaisia vaihtoehtoja, jotka soveltuisivat ABB Oy Sähköasemat -yksikön käyttöön. Etsintä tehtiin lähinnä Internetin avulla, ja se tuottikin muutaman potentiaalisen löydöksen, joista saattaisi olla hyötyä. Ohjelmien tarjonta IEC 60865 -standardin mukaisten laskelmien tekemiseen oli kuitenkin yllättävän niukka.

Osittain tästä em. tarjonnan niukkuudesta johtuen, tehtiin tutkimuksen lopuksi

oma, IEC 60865 -standardiin perustuva tietokoneohjelma oikosulkuvirran mekaanisten ja termisten vaikutusten laskentaan. Osittain syynä oli myös halu soveltaa tässä tutkimuksessa hankittua tietoa käytäntöön. Ohjelman suunnittelussa ja testauksessa pyrittiinkin hyödyntämään kaikki se tieto ja taito, mitä edeltävä tutkimus oli tuonut tullessaan.

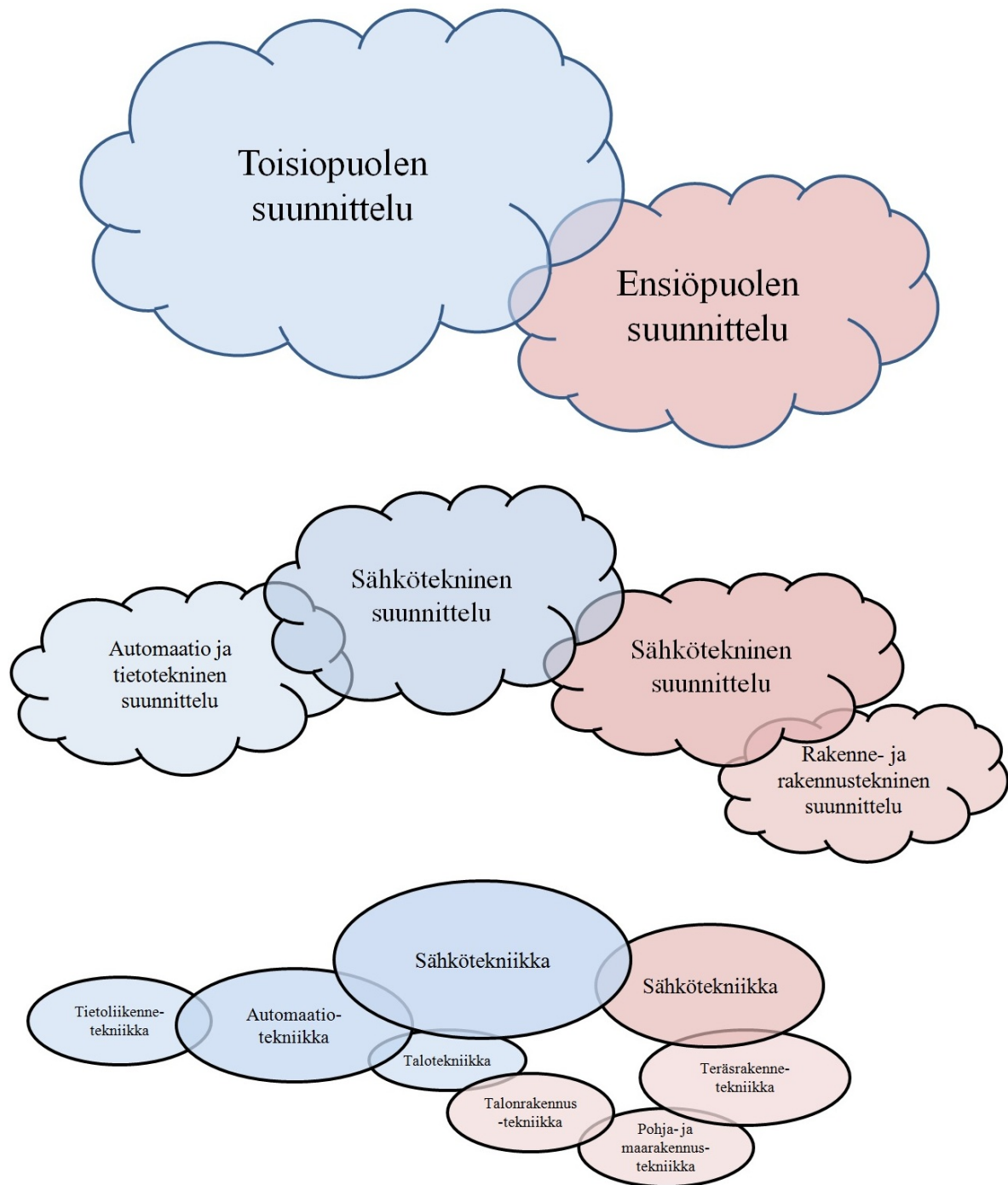
Tämän tutkimuksen tuloksena saatiin lopulta kokonaisvaltainen kuva sähköaseman ensiöpuoleen liittyvistä laskelmista, niiden perusteista ja käytännön soveltamisesta. Tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää niin vanhojen laskentamenetelmien parantamisessa kuin uusien suunnittelussakin.

## Viitteet

- [1] Elovaara, J. ja Laiho, Y. *Sähkölaitostekniikan perusteet*. Otakustantamo, 1988. 461 s.
- [2] ABB Oy. *Teknisiä tietoja ja raulukoita*. 9. painos. Vaasa, ABB Oy, 2000. 626 s. ISBN 951-99366-0-2.
- [3] Sähkölaki. Helsinki, 1979. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/>.
- [4] SFS 6001. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki, Suomen sähköteknillinen standardoimisyhdistys SESKO RY, 2001. 112 s.
- [5] HD 637. Harmonization document: Power installations exceeding 1 kV a.c. Brysseli, Belgia, CENELEC, 1999. 172 s.
- [6] IEC 60909-0. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents. Geneve, Sveitsi, IEC, 2001. 138 s.
- [7] CIGRÉ 105. The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations. CIGRE Study Committee 23 (Substations), Pariisi, Ranska, 1996. 90 s.
- [8] ABB AG. *Switchgear Manual*. 11. painos. Saksa, ABB AG, 2006. 896 s. ISBN 10: 3-589-24112-8.
- [9] IEC 60865-1. Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods. 2. painos. Geneve, Sveitsi, IEC, 1993. 116 s.
- [10] CIGRÉ 214. The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (Part II). CIGRE Working Group 23.03, 2002. 64 s.
- [11] IEC 60168. Tests on indoor and outdoor post insulators of ceramic material or glass for systems with nominal voltages greater than 1 000 V. 4.2 painos. Geneve, Sveitsi, IEC, 2001. 91 s.
- [12] SFS-EN 50341-1 ja -3-7. Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV Jännitteellä, Osat 1 ja 3-7. Helsinki, Suomen sähköteknillinen standardoimisyhdistys SESKO RY, 2002, 2006. 404+49 s.
- [13] SFS-EN 1998-1 ja 6. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Osat 1 ja 6. Brysseli, Belgia, CEN, 2004. 229 s.
- [14] Bellorini, S., Bettinali, F., Clementel, S., Gatti, F., Carrettin, V. ja Zafferani, G. Seismic risk evaluation for high voltage power stations: a case study. Pariisi, Ranska, CIGRÉ 23-204, 1998.
- [15] IEC 60076-10. Power transformers - Part 10: Determination of sound levels. Geneve, Sveitsi, IEC, 2001. 69 s.

- [16] Babusci, G., Pirovano, G. ja Tavano, F. ENEL 380 kV Substations: Short-circuit uprating of rigid busbars systems and flexible bounded conductors connections between components. Pariisi, Ranska, CIGRÉ 23-108, 1998.
- [17] IEC 60826. Design criteria of overhead transmission lines. 3. painos. Geneve, Sveitsi, IEC, 2003. 244 s.
- [18] Koski, P. Software calculation tools in electric power system substation design. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 2007.
- [19] IEC 60865-2. Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2: Examples of calculation. Geneve, Sveitsi, IEC, 1994. 82 s.
- [20] Stein, N., Miri, A. M. ja Meyer, W. 400 kV Substation stranded conductor buses - Tests and calculations of short-circuit constraints and behaviour. *7th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment OPTIM* 2000, s. 251–258. Brasov, Romania.
- [21] Bergeron, D. A. ja Trahan Jr, R. E. A static finite element analysis of substation busbar structures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, Vol. 14, nro 3, s. 890–896. Department of Electrical Engineering, University of New Orleans, New Orleans, Yhdysvallat.

## Liite A



Kuva A1: Sähköaseman suunnittelun osa-alueet.

## Liite B

Tässä liitteessä on esitetty Excel-laskentaohjelman tulosteet seuraavan taulukon mukaisesti:

CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENT EFFECTS IN OPEN AIR HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS		
Mechanical effects on arrangement with rigid tubular conductors (according to IEC 60865-2, example 3)	Mechanical effects on arrangement with flexible conductors (according to IEC 60865-2, example 4 and 5)	Thermal effect on bare conductors (according to IEC 60865-2, example 6)
IEC865_mrt.xlsm	IEC865_mfc.xlsm	IEC865_tbc.xlsm
<b>Kuvat: B1–B4</b>	<b>Kuvat: B5–B16</b>	<b>Kuvat: B17–B18</b>

## CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENT EFFECTS IN OPEN AIR HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS (according to IEC 60865)

### Mechanical effects on arrangement with rigid tubular conductors

#### 0. Project data

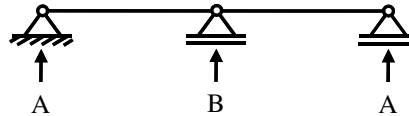
Customer	Aalto University School of Science and Technology
Substation	IEC 60865-2
Bay	Example 3
Date	13.2.2010
Operator	Rauno Hirvonen
Document number	Master's Thesis: Appendix B
Revision	-

#### 1. Calculation data

##### System

System voltage	$U$	=	380	kV
System frequency	$f$	=	50	Hz
Three-phase initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.)	$I_{k3}''$	=	50	kA
Factor to calculate the peak short-circuit current	$\kappa$	=	1,81	
Three-phase automatic reclosing			With	

##### Busbar arrangement



##### Type of beam and support

2a. Continuous beam. Equidistant simple supports.  
Two spans.

Distance between supports	$l$	=	18	m
Centre-line distance between conductors	$a$	=	5	m

##### Tubular conductor

Mass per unit length	$m'$	=	7,84	kg/m
Outside diameter	$D$	=	160	mm
Wall thickness	$s$	=	6	mm
Young's modulus	$E$	=	70000	N/mm <sup>2</sup>
Stress corresponding to the yield point	$R_{p0,2min}$	=	160	N/mm <sup>2</sup>
	$R_{p0,2max}$	=	240	N/mm <sup>2</sup>

#### 2. Maximum force on the central main conductor

The maximum force is:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} \quad F_{m3} = 10,213869 \text{ kN} \quad (2)$$

where

effective distance between neighbouring main conductors

( $a_m = a$  for tubular conductors)

peak short-circuit current ( $i_{p3} = \sqrt{2} \kappa I_{k3}''$ )

magnetic constant, permeability of vacuum

$a_m$	=	5	m
$i_{p3}$	=	127,98633	kA
$\mu_o$	=	1,257E-06	Vs/Am

### 3. Conductor stress and forces on supports

#### 3.1. Simplified method

##### 3.1.1. Conductor bending stress without three-phase automatic reclosing

The maximum bending stress is:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m = V_{\sigma} V_r \beta F_{m3} / (8Z) \quad \sigma_{\text{tot}} = 155,7233 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

where

according to IEC 60865-1, Table 2

$$V_{\sigma} V_r = 1,0$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\beta = 0,73$$

section modulus of main conductor

$$Z = \frac{J}{D/2}$$

$$Z = 107731,34 \text{ mm}^3$$

where

second moment of main conductor area

$$J = \frac{\pi}{64} [D^4 - (D - 2s)^4]$$

$$J = 8618507,1 \text{ mm}^4$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2\min} \quad 155,723 \leq 211,73389 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

where

Factor of plasticity for tubular conductor according to IEC 60865-1, Table 4 is:

$$q = 1,7 \cdot \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4} \quad q = 1,3233368$$

Conclusion: The busbars withstand the short-circuit force

##### 3.1.2 Bending force on the supports without three-phase automatic reclosing

The force on A (outer) support

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} \quad F_{dA} = 4,7224696 \text{ kN} \quad (15)$$

The force on the B (inner) support

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} \quad F_{dB} = 15,741565 \text{ kN}$$

where

according to IEC 60865-1, Table 2

$$V_F V_r = 1,2329561$$

with  $\sigma_{\text{tot}} / (0,8 R_{p0,2\max}) = 0,811058868$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\alpha_A = 0,375$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\alpha_B = 1,25$$

##### 3.1.3 Conductors bending stress with three-phase automatic reclosing

The maximum bending stress is:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m = V_{\sigma} V_r \beta F_{m3} / (8Z) \quad \sigma_{\text{tot}} = 280,30194 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

where

according to IEC 60865-1, Table 2

$$V_{\sigma} V_r = 1,8$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\beta = 0,73$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2\min} \quad 280,302 \leq 211,73389 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

Conclusion: The busbars do not withstand the short-circuit force!



### 3.1.4 Bending forces on the supports with three-phase automatic reclosing

The force on A (outer) support

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} \quad F_{dA} = 3,8302009 \text{ kN} \quad (15)$$

The force on the B (inner) support

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} \quad F_{dB} = 12,767336 \text{ kN}$$

where

according to IEC 60865-1, Table 2

$$V_F V_r = 1,0$$

$$\sigma_{tot}/(0,8R_{p0,2max}) = 1,459905963$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\alpha_A = 0,375$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\alpha_B = 1,25$$

### 3.2 Detailed method

#### 3.2.1 Natural frequency $f_c$ and factors $V_F$ , $V_\sigma$ and $V_r$ (16)

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad f_c = 2,0976261 \text{ Hz} \quad (16)$$

where

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\gamma = 2,45$$

The ratio between natural and rated frequency

$$f_c/f = 0,0419525$$

#### 3.2.2 Conductor bending stress without three-phase automatic reclosing

The maximum bending stress is:

$$\sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma V_r \beta F_{m3}/(8Z) \quad \sigma_{tot} = 49,470951 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

where

according to IEC 60865-1, Figure 4

$$V_\sigma = 0,317685$$

according to IEC 60865-1, 2.2.2.6.2

$$V_r = 1,0$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\beta = 0,73$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if

$$\sigma_{tot} \leq qR_{p0,2min} \quad 49,471 \leq 211,73389 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

Conclusion:

The busbars withstand the short-circuit force

#### 3.2.3 Bending force on the supports without three-phase automatic reclosing

The force on A (outer) support

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} \quad F_{dA} = 1,3734253 \text{ kN} \quad (15)$$

The force on the B (inner) support

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} \quad F_{dB} = 4,5780842 \text{ kN}$$

where

according to IEC 60865-1, Figure 4

$$V_F = 0,3585779$$

according to IEC 60865-1, 2.2.2.6.2

$$V_r = 1,0$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\alpha_A = 0,375$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\alpha_B = 1,25$$

#### 3.2.4 Conductor bending stress with three-phase automatic reclosing

The maximum bending stress is:

$$\sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma V_r \beta F_{m3}/(8Z) \quad \sigma_{tot} = 89,047713 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

where

according to IEC 60865-1, Figure 4

$$V_{\sigma} = 0,317685$$

according to IEC 60865-1, Figure 5

$$V_r = 1,8$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\beta = 0,73$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if

$$\sigma_{\text{tot}} \leq qR_{p0,2\text{min}} \quad 89,0477 \leq 211,73389 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

Conclusion: The busbars withstand the short-circuit force

### 3.2.5 Bending force on the supports with three-phase automatic reclosing

The force on A (outer) support

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3}$$

$$F_{dA} = 2,4721655 \text{ kN} \quad (15)$$

The force on the B (inner) support

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3}$$

$$F_{dB} = 8,2405516 \text{ kN}$$

where

according to IEC 60865-1, Figure 4

$$V_F = 0,3585779$$

according to IEC 60865-1, Figure 5

$$V_r = 1,8$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\alpha_A = 0,375$$

according to IEC 60865-1, Table 3

$$\alpha_B = 1,25$$

### 3.3 Conclusions

	<i>Simplified method</i>	<i>Detailed method</i>	
Without three-phase automatic reclosing			
The calculated bending stresses $\sigma_{\text{tot}}$ are:	155,72	49,47	N/mm <sup>2</sup>
The A (outer) supports have to withstand a dynamic bending force of	4,72	1,37	kN
The B (inner) supports have to withstand a dynamic bending force of	15,74	4,58	kN
With three-phase automatic reclosing			
The calculated bending stresses $\sigma_{\text{tot}}$ are:	280,30	89,05	N/mm <sup>2</sup>
The A (outer) supports have to withstand a dynamic bending force of	3,83	2,47	kN
The B (inner) supports have to withstand a dynamic bending force of	12,77	8,24	kN

### Final results and conclusions

With and without three-phase automatic reclosing

The calculated bending stresses is:

$$\sigma_{\text{tot}} = 89,0 \text{ N/mm}^2$$

The A (outer) supports have to withstand a dynamic bending force of

$$F_{dA} = 2,5 \text{ kN}$$

The B (inner) supports have to withstand a dynamic bending force of

$$F_{dB} = 8,2 \text{ kN}$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force

if  $\sigma_{\text{tot}} \leq qR_{p0,2\text{min}}$

$$89,0 \leq 211,73389 \text{ N/mm}^2$$

Final conclusion: The busbars withstand the short-circuit force

# **CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENT EFFECTS IN OPEN AIR HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS (according to IEC 60865)**

## **Mechanical effects on arrangement with flexible conductors**

### **0. Project data**

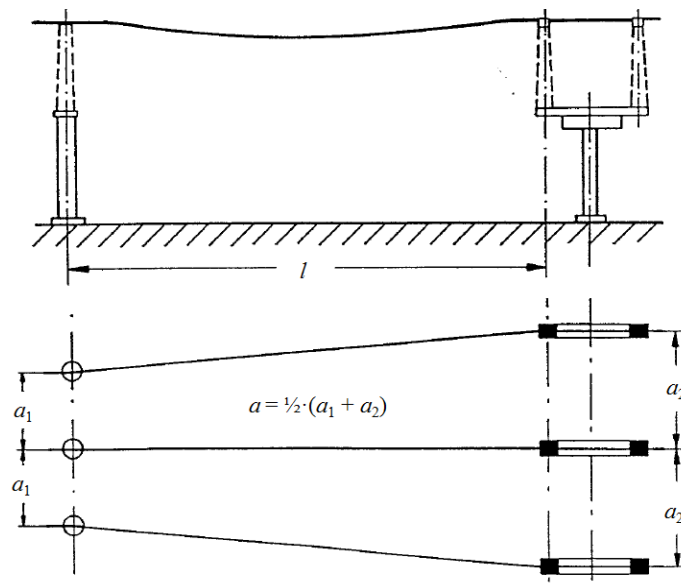
Customer	Aalto University School of Science and Technology
Substation	IEC 60865-2
Bay	Example 4
Date	13.2.2010
Operator	Rauno Hirvonen
Document number	Master's Thesis: Appendix B
Revision	-

### **1. Calculation data**

#### *System*

System voltage	$U$	=	110	kV
System frequency	$f$	=	50	Hz
Three-phase initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.)	$I_{k3}''$	=	19	kA
Line to earth initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.)	$I_{k1}''$	=	5	kA
Factor to calculate the peak short-circuit current	$\kappa$	=	1,81	
Duration of the first short-circuit current flow	$T_{k1}$	=	0,3	s

#### *Arrangement of the conductors*



Distance between supports	$l$	=	11,5	m
Length of one insulator chain	$l_i$	=	0	m
Average centre-line distance between conductors	$a$	=	2	m
Resulting spring constant of both supports of the span	$S$	=	100	N/mm

Conductor

Number of sub-conductors per phase  
 Sub-conductor cross-section  
 Sub-conductor mass per unit length  
 Young's modulus  
 Conductor diameter  
 Material constant

$n$	=	1	
$A_s$	=	242	mm <sup>2</sup>
$m_{s'}$	=	0,67	kg/m
$E$	=	55000	N/mm <sup>2</sup>
$d_s$	=	20	mm
$c_{th}$	=	0,27	10 <sup>-18</sup> m <sup>4</sup> /(A <sup>2</sup> s)

*Static conductor tensile force*

$F_{st}$  at minimum ambient temperature  
 Minimum ambient temperature (for information only)  
 $F_{st}$  at maximum operating temperature  
 Maximum operating temperature (for information only)

$F_{stf}$	=	0,4	kN
$T_f$	=	-20	°C
$F_{sth}$	=	0,273	kN
$T_h$	=	60	°C

*Additional concentrated connections*

Additional mass on one conductor  
 Conventional value of acceleration of gravity

$m_c$	=	0	kg
$g_n$	=	9,81	m/s <sup>2</sup>

**2. Electromagnetic force and characteristic parameters**

The electromagnetic force per unit length is:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} \quad F' = 27,075 \text{ N/m} \quad (19)$$

where magnetic constant, permeability of vacuum  
 and cord length of a flexible main conductor in the span  $l - 2l_i =$

$\mu_o$	=	1,26E-06	Vs/Am
$l_c$	=	11,5	m

The parameter  $r$  is:

$$r = \frac{F'}{nm_{sc}' g_n} \quad r = 4,119312 \quad (20)$$

where the resulting mass per unit length of one sub-conductor is:

$$m_{sc}' = m_s' + \frac{m_c}{nl_c} \quad m_{sc}' = 0,67 \text{ kg/m}$$

The direction of the resulting force is:

$$\delta_l = \arctan r \quad \delta_l = 76,35489^\circ \quad (21)$$

The equivalent static conductor sags at midspan are:

$$b_{cf} = \frac{nm_{sc}' g_n l^2}{8F_{stf}} \quad b_{ch} = \frac{nm_{sc}' g_n l^2}{8F_{sth}} \quad \begin{matrix} b_{cf} = 0,271637 \text{ m} \\ b_{ch} = 0,398003 \text{ m} \end{matrix} \quad (22)$$

The periods of the conductor oscillation are:

$$T_f = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{cf}}{g_n}} \quad T_h = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{ch}}{g_n}} \quad \begin{matrix} T_f = 0,935158 \text{ s} \\ T_h = 1,131967 \text{ s} \end{matrix} \quad (23)$$

If  $T_{kl} > 0,4T$  or it is not known, then the value  $0,4T$  shall be used for  $T_{kl}$   
 in equations for  $\delta_k$ ,  $\phi$ , and  $\epsilon_{th}$ .

for minimum ambient temperature ( $T = T_f$ )

$$T_{klf} = 0,3 \text{ s}$$

for maximum operating temperature ( $T = T_h$ )

$$T_{k1h} = 0,3 \text{ s}$$

The resulting periods of oscillation are:

$$T_{resf} = \frac{T_f}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2}{64} \left( \frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad T_{resh} = \frac{T_h}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2}{64} \left( \frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad \begin{matrix} T_{resf} = 0,510919 \text{ s} \\ T_{resh} = 0,618445 \text{ s} \end{matrix} \quad (24)$$

The stiffness norms are:

$$N_f = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{nE_{sf}A_s} \quad N_h = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{nE_{sh}A_s} \quad \begin{matrix} N_f = 1,09E-06 \text{ 1/N} \\ N_h = 1,1E-06 \text{ 1/N} \end{matrix} \quad (25)$$

where

$$E_{sf} = \begin{cases} E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{stf}}{nA_s \sigma_{fin}} - 90^\circ \right) \right] & \text{for } F_{stf}/nA_s \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{for } F_{stf}/nA_s > \sigma_{fin} \end{cases} \quad E_{sf} = 1,85E+10 \text{ N/m}^2$$

$$E_{sh} = \begin{cases} E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{sth}}{nA_s \sigma_{fin}} - 90^\circ \right) \right] & \text{for } F_{sth}/nA_s \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{for } F_{sth}/nA_s > \sigma_{fin} \end{cases} \quad E_{sh} = 1,79E+10 \text{ N/m}^2 \quad (26)$$

where the lowest stress when Young's modulus becomes constant

$$\sigma_{fin} = 50000000 \text{ N/m}^2 \quad (27)$$

The stress factors are:

$$\zeta_f = \frac{(nm'_{sc} g_n l)^2}{24 F_{stf}^3 N_f} \quad \zeta_h = \frac{(nm'_{sc} g_n l)^2}{24 F_{sth}^3 N_f} \quad \begin{matrix} \zeta_f = 3,403235 \\ \zeta_h = 10,62783 \end{matrix} \quad (28)$$

The span swing-out angles are:

$$\delta_{kf} = \begin{cases} \delta_1 \left[ 1 - \cos \left[ 360^\circ \frac{T_{k1f}}{T_{resf}} \right] \right] & \text{for } 0 \leq T_{k1f}/T_{resf} \leq 0,5 \\ 2\delta_1 & \text{for } T_{k1f}/T_{resf} > 0,5 \end{cases} \quad \delta_{kf} = 152,7098^\circ$$

$$\delta_{kh} = \begin{cases} \delta_1 \left[ 1 - \cos \left[ 360^\circ \frac{T_{k1h}}{T_{resh}} \right] \right] & \text{for } 0 \leq T_{k1h}/T_{resh} \leq 0,5 \\ 2\delta_1 & \text{for } T_{k1h}/T_{resh} > 0,5 \end{cases} \quad \delta_{kh} = 152,3749^\circ \quad (29)$$

The maximum swing-out angles are:

$$\delta_{mf} = \begin{cases} 1,25 \arccos \chi_f & \text{for } 0,766 \leq \chi_f \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi_f & \text{for } -0,985 \leq \chi_f < 0,766 \\ 180^\circ & \text{for } \chi_f < -0,985 \end{cases} \quad \delta_{mf} = 180^\circ$$

$$\delta_{mh} = \begin{cases} 1,25 \arccos \chi_h & \text{for } 0,766 \leq \chi_h \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi_h & \text{for } -0,985 \leq \chi_h < 0,766 \\ 180^\circ & \text{for } \chi_h < -0,985 \end{cases} \quad \delta_{mh} = 180^\circ \quad (31)$$

where

$$\begin{aligned} \chi_f &= \begin{cases} 1 - r \sin \delta_{kf} & \text{for } 0 \leq \delta_{kf} \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{for } \delta_{kf} > 90^\circ \end{cases} & \chi_f &= -3,119312 \\ \chi_h &= \begin{cases} 1 - r \sin \delta_{kh} & \text{for } 0 \leq \delta_{kh} \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{for } \delta_{kh} > 90^\circ \end{cases} & \chi_h &= -3,119312 \end{aligned} \quad (30)$$

### 3. Tensile force $F_t$ during the short circuit caused by swing out

The load parameters are:

$$\begin{aligned} \varphi_f &= \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2}-1) & \text{for } T_{k1f} \geq T_{resf}/4 \\ 3(r \sin \delta_{kf} + \cos \delta_{kf} - 1) & \text{for } T_{k1f} < T_{resf}/4 \end{cases} & \varphi_f &= 9,716861 \\ \varphi_h &= \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2}-1) & \text{for } T_{k1h} \geq T_{resh}/4 \\ 3(r \sin \delta_{kh} + \cos \delta_{kh} - 1) & \text{for } T_{k1h} < T_{resh}/4 \end{cases} & \varphi_h &= 9,716861 \end{aligned} \quad (32)$$

The tensile forces are:

$$\begin{aligned} F_{tf} &= \begin{cases} F_{stf}(1 + \varphi_f \psi_f) & \text{for } n = 1, \text{ single conductor} \\ 1,1 F_{stf}(1 + \varphi_f \psi_f) & \text{for } n \geq 2, \text{ bundled conductors} \end{cases} & F_{tf} &= 2,636761 \text{ kN} \\ F_{th} &= \begin{cases} F_{sth}(1 + \varphi_h \psi_h) & \text{for } n = 1, \text{ single conductor} \\ 1,1 F_{sth}(1 + \varphi_h \psi_h) & \text{for } n \geq 2, \text{ bundled conductors} \end{cases} & F_{th} &= 2,255111 \text{ kN} \end{aligned} \quad (34)$$

where

$$\begin{aligned} \text{factor } \psi_f \text{ is a real solution of:} & \quad f(\psi_f) = 0 \\ \varphi_f^2 \psi_f^3 + \varphi_f(2 + \zeta_f) \psi_f^2 + (1 + 2\zeta_f) \psi_f - \zeta_f(2 + \varphi_f) &= 0 & \psi_f &= 0,575484 \\ \text{factor } \psi_h \text{ is a real solution of:} & \quad f(\psi_h) = 0 \\ \varphi_h^2 \psi_h^3 + \varphi_h(2 + \zeta_h) \psi_h^2 + (1 + 2\zeta_h) \psi_h - \zeta_h(2 + \varphi_h) &= 0 & \psi_h &= 0,747204 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\text{The tensile force } F_t \text{ is the maximum value of } F_{tf} \text{ and } F_{th} \quad F_t = 2,636761 \text{ kN}$$

### 4. Tensile force $F_f$ after short circuit caused by drop (drop force)

The tensile forces are only significant for  $r > 0,6$  and  $\delta \geq 70^\circ$ :

Significant? Yes

$$\begin{aligned} F_{ff} &= 1,2 F_{stf} \sqrt{1 + 8\zeta_f \cdot \frac{\delta_{nf}}{180^\circ}} & F_{fh} &= 1,2 F_{sth} \sqrt{1 + 8\zeta_h \cdot \frac{\delta_{nh}}{180^\circ}} \\ F_{ff} &= 2,550146 \text{ kN} & F_{fh} &= 3,038437 \text{ kN} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\text{The tensile force } F_f \text{ is the maximum value of } F_{ff} \text{ and } F_{fh} \quad F_f = 3,038437 \text{ kN}$$

NOTE - In short spans the bending stiffness of the span reduces the span drop, which means that the span drop is calculated to be too large if the span length is less than approximately 100 times the diameter of the single conductor, i.e.  $l < 100 d_s$ .

Span drop is not reduced.

### 5. Horizontal span displacement $b_h$ and minimum air clearance $a_{min}$

The elastic expansions are:

$$\begin{aligned} \epsilon_{elaf} &= N_f(F_{tf} - F_{stf}) & \epsilon_{elaf} &= 0,002445 \\ \epsilon_{elah} &= N_h(F_{th} - F_{sth}) & \epsilon_{elah} &= 0,002182 \end{aligned} \quad (36)$$

The thermal expansions are:

$$\varepsilon_{thf} = \begin{cases} c_{th} \left[ \frac{I_{k3}''}{nA_s} \right]^2 \frac{T_{resf}}{4} & \text{for } T_{klf} \geq T_{resf}/4 \\ c_{th} \left[ \frac{I_{k3}''}{nA_s} \right]^2 T_{klf} & \text{for } T_{klf} < T_{resf}/4 \end{cases} \quad \varepsilon_{thf} = 0,000213$$

$$\varepsilon_{thh} = \begin{cases} c_{th} \left[ \frac{I_{k3}''}{nA_s} \right]^2 \frac{T_{resh}}{4} & \text{for } T_{klh} \geq T_{resh}/4 \\ c_{th} \left[ \frac{I_{k3}''}{nA_s} \right]^2 T_{klh} & \text{for } T_{klh} < T_{resh}/4 \end{cases} \quad \varepsilon_{thh} = 0,000257 \quad (37)$$

The maximum horizontal span displacements  $b_h$  for  $l_c = l$  (slack conductors) are:

$$b_{hf} = \begin{cases} C_F C_{Df} b_{cf} & \text{for } \delta_{mf} \geq 90^\circ \\ C_F C_{Df} b_{cf} \sin \delta_{mf} & \text{for } \delta_{mf} < 90^\circ \end{cases} \quad b_{hf} = 0,521408 \quad \text{m} \quad (40)$$

$$b_{hh} = \begin{cases} C_F C_{Dh} b_{ch} & \text{for } \delta_{mh} \geq 90^\circ \\ C_F C_{Dh} b_{ch} \sin \delta_{mh} & \text{for } \delta_{mh} < 90^\circ \end{cases} \quad b_{hh} = 0,607854 \quad \text{m} \quad (40)$$

where

dilatation factors are:

$$C_{Df} = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[ \frac{l}{b_{cf}} \right]^2 (\varepsilon_{claf} + \varepsilon_{tf})} \quad C_{Dh} = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[ \frac{l}{b_{ch}} \right]^2 (\varepsilon_{clah} + \varepsilon_{th})} \quad \begin{matrix} C_{Df} = 1,669131 \\ C_{Df} = 1,328051 \end{matrix} \quad (38)$$

and form factors are:

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{for } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1r & \text{for } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{for } r \geq 0,8 \end{cases} \quad C_F = 1,15 \quad (39)$$

The minimum air clearance is:

$$a_{\min} = a - 2b_h \quad a_{\min} = 0,784291 \quad \text{m} \quad (42)$$

## 7. Conclusions

### 7.1 Structure loads due to electromagnetic effects

To the structure and insulators, the maximum value of  $F_t$  and  $F_f$  shall be applied as a static load: 3,04 kN

To the connectors, the maximum value of  $1,5 \cdot F_t$  and  $1,0 \cdot F_f$  shall be applied as a static load: 3,96 kN

### 7.2 Horizontal span displacement $b_h$ and minimum air clearance $a_{\min}$

Horizontal span displacement  $b_h$  0,61 m

Minimum air clearance  $a_{\min}$  0,78 m

# **CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENT EFFECTS IN OPEN AIR HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS (according to IEC 60865)**

## **Mechanical effects on arrangement with flexible conductors**

### **0. Project data**

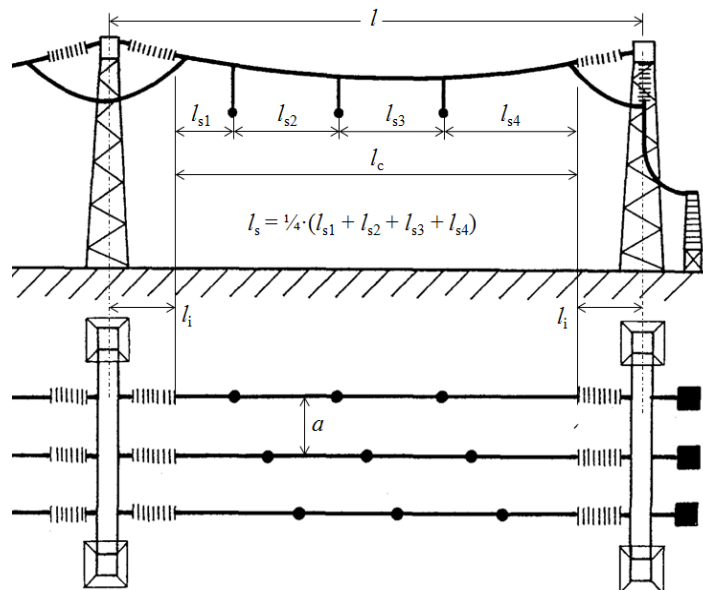
Customer	Aalto University School of Science and Technology
Substation	IEC 60865-2
Bay	Example 5
Date	13.2.2010
Operator	Rauno Hirvonen
Document number	Master's Thesis: Appendix B
Revision	-

### **1. Calculation data**

#### *System*

System voltage	$U$	=	380	kV
System frequency	$f$	=	50	Hz
Three-phase initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.)	$I_{k3}''$	=	63	kA
Line to earth initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.)	$I_{k1}''$	=	54	kA
Factor to calculate the peak short-circuit current	$\kappa$	=	1,81	
Duration of the first short-circuit current flow	$T_{k1}$	=	0,5	s

#### *Arrangement of the conductors*



Distance between supports	$l$	=	48	m
Length of one insulator chain	$l_i$	=	5,3	m
Average centre-line distance between conductors	$a$	=	5	m
Resulting spring constant of both supports of the span	$S$	=	500	N/mm



Conductor

Number of sub-conductors per phase

$n$	=	2
-----	---	---

Sub-conductor cross-section

$A_s$	=	1090	mm <sup>2</sup>
-------	---	------	-----------------

Sub-conductor mass per unit length

$m_{s'}$	=	3,25	kg/m
----------	---	------	------

Young's modulus

$E$	=	60000	N/mm <sup>2</sup>
-----	---	-------	-------------------

Conductor diameter

$d_s$	=	43	mm
-------	---	----	----

Material constant

$c_{th}$	=	0,27	10 <sup>-18</sup> m <sup>4</sup> /(A <sup>2</sup> s)
----------	---	------	--

Centre-line distance between sub-conductors

$a_s$	=	0,4	m
-------	---	-----	---

Average centre-line distance between connecting pieces or between one connecting piece and the adjacent support

$l_s$	=	9,4	m
-------	---	-----	---

*Static conductor tensile force* $F_{st}$  at minimum ambient temperature

$F_{stf}$	=	23,1	kN
-----------	---	------	----

Minimum ambient temperature (for information only)

$T_f$	=	-20	°C
-------	---	-----	----

 $F_{st}$  at maximum operating temperature

$F_{sth}$	=	18,9	kN
-----------	---	------	----

Maximum operating temperature (for information only)

$T_h$	=	60	°C
-------	---	----	----

*Additional concentrated connections*

Additional mass on one conductor

$m_c$	=	108	kg
-------	---	-----	----

Conventional value of acceleration of gravity

$g_n$	=	9,81	m/s <sup>2</sup>
-------	---	------	------------------

**2. Electromagnetic force and characteristic parameters**

The electromagnetic force per unit length is:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l}$$

$F'$	=	92,77538	N/m	(19)
------	---	----------	-----	------

where magnetic constant, permeability of vacuum

$\mu_o$	=	1,26E-06	Vs/Am
---------	---	----------	-------

and cord length of a flexible main conductor in the span  $l - 2l_i =$ 

$l_c$	=	37,4	m
-------	---	------	---

The parameter  $r$  is:

$$r = \frac{F'}{nm'_{sc}g_n}$$

$r$	=	1,007406	(20)
-----	---	----------	------

where the resulting mass per unit length of one sub-conductor is:

$$m'_{sc} = m'_s + \frac{m_c}{nl_c}$$

$m'_{sc}$	=	4,69385	kg/m
-----------	---	---------	------

The direction of the resulting force is:

$$\delta_l = \arctan r$$

$\delta_l$	=	45,21138	°	(21)
------------	---	----------	---	------

The equivalent static conductor sags at midspan are:

$$b_{cf} = \frac{nm'_{sc}g_n l^2}{8F_{stf}} \quad b_{ch} = \frac{nm'_{sc}g_n l^2}{8F_{sth}}$$

$b_{cf}$	=	1,148177	m
$b_{ch}$	=	1,403327	m

The periods of the conductor oscillation are:

$$T_f = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{cf}}{g_n}} \quad T_h = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{ch}}{g_n}}$$

$T_f$	=	1,922626	s
$T_h$	=	2,125543	s

If  $T_{kl} > 0,4T$  or it is not known, then the value  $0,4T$  shall be used for  $T_{kl}$  in equations for  $\delta_k$ ,  $\varphi$ , and  $\varepsilon_{th}$ .

$$\begin{aligned} \text{for minimum ambient temperature } (T = T_f) & \quad T_{klf} = 0,5 \text{ s} \\ \text{for maximum operating temperature } (T = T_h) & \quad T_{klh} = 0,5 \text{ s} \end{aligned}$$

The resulting periods of oscillation are:

$$\begin{aligned} T_{resf} &= \frac{T_f}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2}{64} \left( \frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} & T_{resh} &= \frac{T_h}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2}{64} \left( \frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} & T_{resf} &= 1,679082 \text{ s} \\ & & & & T_{resh} &= 1,856295 \text{ s} \end{aligned} \quad (24)$$

The stiffness norms are:

$$\begin{aligned} N_f &= \frac{1}{Sl} + \frac{1}{nE_{sf}A_s} & N_h &= \frac{1}{Sl} + \frac{1}{nE_{sh}A_s} & N_f &= 5,61E-08 \text{ 1/N} \\ & & & & N_h &= 5,73E-08 \text{ 1/N} \end{aligned} \quad (25)$$

where

$$\begin{aligned} E_{sf} &= \begin{cases} E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{stf}}{nA_s \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] & \text{for } F_{stf}/nA_s \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{for } F_{stf}/nA_s > \sigma_{fin} \end{cases} & E_{sf} &= 3,17E+10 \text{ N/m}^2 \\ E_{sh} &= \begin{cases} E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{sth}}{nA_s \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] & \text{for } F_{sth}/nA_s \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{for } F_{sth}/nA_s > \sigma_{fin} \end{cases} & E_{sh} &= 2,93E+10 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (26)$$

$$\text{where the lowest stress when Young's modulus becomes constant} \quad \sigma_{fin} = 50000000 \text{ N/m}^2 \quad (27)$$

The stress factors are:

$$\begin{aligned} \zeta_f &= \frac{(nm'_{sc} g_n l)^2}{24 F_{stf}^3 N_f} & \zeta_h &= \frac{(nm'_{sc} g_n l)^2}{24 F_{sth}^3 N_f} & \zeta_f &= 1,17687 \\ & & & & \zeta_h &= 2,103833 \end{aligned} \quad (28)$$

The span swing-out angles are:

$$\begin{aligned} \delta_{kf} &= \begin{cases} \delta_1 \left[ 1 - \cos \left[ 360^\circ \frac{T_{klf}}{T_{resf}} \right] \right] & \text{for } 0 \leq T_{klf}/T_{resf} \leq 0,5 \\ 2\delta_1 & \text{for } T_{klf}/T_{resf} > 0,5 \end{cases} & \delta_{kf} &= 58,58183^\circ \\ \delta_{kh} &= \begin{cases} \delta_1 \left[ 1 - \cos \left[ 360^\circ \frac{T_{klh}}{T_{resh}} \right] \right] & \text{for } 0 \leq T_{klh}/T_{resh} \leq 0,5 \\ 2\delta_1 & \text{for } T_{klh}/T_{resh} > 0,5 \end{cases} & \delta_{kh} &= 50,69569^\circ \end{aligned} \quad (29)$$

The maximum swing-out angles are:

$$\begin{aligned} \delta_{mf} &= \begin{cases} 1,25 \arccos \chi_f & \text{for } 0,766 \leq \chi_f \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi_f & \text{for } -0,985 \leq \chi_f < 0,766 \\ 180^\circ & \text{for } \chi_f < -0,985 \end{cases} & \delta_{mf} &= 91,93512^\circ \\ \delta_{mh} &= \begin{cases} 1,25 \arccos \chi_h & \text{for } 0,766 \leq \chi_h \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi_h & \text{for } -0,985 \leq \chi_h < 0,766 \\ 180^\circ & \text{for } \chi_h < -0,985 \end{cases} & \delta_{mh} &= 87,26296^\circ \end{aligned} \quad (31)$$

where

$$\chi_f = \begin{cases} 1 - r \sin \delta_{kf} & \text{for } 0 \leq \delta_{kf} \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{for } \delta_{kf} > 90^\circ \end{cases} \quad \chi_f = 0,140294$$

$$\chi_h = \begin{cases} 1 - r \sin \delta_{kh} & \text{for } 0 \leq \delta_{kh} \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{for } \delta_{kh} > 90^\circ \end{cases} \quad \chi_h = 0,220477 \quad (30)$$

### 3. Tensile force $F_t$ during the short circuit caused by swing out

The load parameters are:

$$\varphi_f = \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2}-1) & \text{for } T_{k1f} \geq T_{resf}/4 \\ 3(r \sin \delta_{kf} + \cos \delta_{kf} - 1) & \text{for } T_{k1f} < T_{resf}/4 \end{cases} \quad \varphi_f = 1,25838$$

$$\varphi_h = \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2}-1) & \text{for } T_{k1h} \geq T_{resh}/4 \\ 3(r \sin \delta_{kh} + \cos \delta_{kh} - 1) & \text{for } T_{k1h} < T_{resh}/4 \end{cases} \quad \varphi_h = 1,25838 \quad (32)$$

The tensile forces are:

$$F_{tf} = \begin{cases} F_{stf}(1 + \varphi_f \psi_f) & \text{for } n = 1, \text{ single conductor} \\ 1,1 F_{stf}(1 + \varphi_f \psi_f) & \text{for } n \geq 2, \text{ bundled conductors} \end{cases} \quad F_{tf} = 44,72855 \text{ kN}$$

$$F_{th} = \begin{cases} F_{sth}(1 + \varphi_h \psi_h) & \text{for } n = 1, \text{ single conductor} \\ 1,1 F_{sth}(1 + \varphi_h \psi_h) & \text{for } n \geq 2, \text{ bundled conductors} \end{cases} \quad F_{th} = 39,34291 \text{ kN} \quad (34)$$

where

$$\begin{aligned} \text{factor } \psi_f \text{ is a real solution of:} & \quad f(\psi_f) = -0 \\ \varphi_f^2 \psi_f^3 + \varphi_f(2 + \zeta_f) \psi_f^2 + (1 + 2\zeta_f) \psi_f - \zeta_f(2 + \varphi_f) &= 0 \quad \psi_f = 0,604169 \\ \text{factor } \psi_h \text{ is a real solution of:} & \quad f(\psi_h) = -0 \\ \varphi_h^2 \psi_h^3 + \varphi_h(2 + \zeta_h) \psi_h^2 + (1 + 2\zeta_h) \psi_h - \zeta_h(2 + \varphi_h) &= 0 \quad \psi_h = 0,709162 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\text{The tensile force } F_t \text{ is the maximum value of } F_{tf} \text{ and } F_{th} \quad F_t = 44,72855 \text{ kN}$$

### 4. Tensile force $F_f$ after short circuit caused by drop (drop force)

The tensile forces are only significant for  $r > 0,6$  and  $\delta \geq 70^\circ$ :

Significant? Yes

$$F_{ff} = 1,2 F_{stf} \sqrt{1 + 8\zeta_f \cdot \frac{\delta_{nf}}{180^\circ}} \quad F_{fh} = 1,2 F_{sth} \sqrt{1 + 8\zeta_h \cdot \frac{\delta_{nh}}{180^\circ}} \quad \begin{aligned} F_{ff} &= 66,80862 \text{ kN} \\ F_{fh} &= 68,63992 \text{ kN} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\text{The tensile force } F_f \text{ is the maximum value of } F_{ff} \text{ and } F_{fh} \quad F_f = 68,63992 \text{ kN}$$

NOTE - In short spans the bending stiffness of the span reduces the span drop, which means that the span drop is calculated to be too large if the span length is less than approximately 100 times the diameter of the single conductor, i.e.  $l < 100 d_s$ .

Span drop is not reduced.

### 5. Horizontal span displacement $b_h$ and minimum air clearance $a_{min}$

The elastic expansions are:

$$\begin{aligned} \epsilon_{elaf} &= N_f(F_{tf} - F_{stf}) & \epsilon_{elaf} &= 0,001214 \\ \epsilon_{elah} &= N_h(F_{th} - F_{sth}) & \epsilon_{elah} &= 0,001172 \end{aligned} \quad (36)$$

The thermal expansions are:

$$\varepsilon_{thf} = \begin{cases} c_{th} \left[ \frac{I_{k3}''}{nA_s} \right]^2 \frac{T_{resf}}{4} & \text{for } T_{klf} \geq T_{resf}/4 \\ c_{th} \left[ \frac{I_{k3}''}{nA_s} \right]^2 T_{klf} & \text{for } T_{klf} < T_{resf}/4 \end{cases} \quad \varepsilon_{thf} = 9,47E-05$$

$$\varepsilon_{thh} = \begin{cases} c_{th} \left[ \frac{I_{k3}''}{nA_s} \right]^2 \frac{T_{resh}}{4} & \text{for } T_{klh} \geq T_{resh}/4 \\ c_{th} \left[ \frac{I_{k3}''}{nA_s} \right]^2 T_{klh} & \text{for } T_{klh} < T_{resh}/4 \end{cases} \quad \varepsilon_{thh} = 0,000105$$
(37)

The maximum horizontal span displacements  $b_h$  for  $l_c = l - 2l_i$  are:

$$b_{hf} = \begin{cases} C_F C_{Df} b_{cf} \sin \delta_1 & \text{for } \delta_{mf} \geq \delta_1 \\ C_F C_{Df} b_{cf} \sin \delta_{mf} & \text{for } \delta_{mf} < \delta_1 \end{cases} \quad b_{hf} = 1,189195 \quad \text{m} \quad (41)$$

$$b_{hh} = \begin{cases} C_F C_{Dh} b_{ch} \sin \delta_1 & \text{for } \delta_{mh} \geq \delta_1 \\ C_F C_{Dh} b_{ch} \sin \delta_{mh} & \text{for } \delta_{mh} < \delta_1 \end{cases} \quad b_{hh} = 1,331962 \quad \text{m} \quad (41)$$

where

dilatation factors are:

$$C_{Df} = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[ \frac{l}{b_{cf}} \right]^2 (\varepsilon_{claf} + \varepsilon_{tf})} \quad C_{Dh} = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[ \frac{l}{b_{ch}} \right]^2 (\varepsilon_{clah} + \varepsilon_{th})} \quad \begin{matrix} C_{Df} = 1,362946 \\ C_{Df} = 1,249014 \end{matrix} \quad (38)$$

and form factors are:

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{for } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1r & \text{for } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{for } r \geq 0,8 \end{cases} \quad C_F = 1,070741 \quad (39)$$

The minimum air clearance is:

$$a_{\min} = a - 2b_h \quad a_{\min} = 2,336075 \quad \text{m} \quad (42)$$

## 6. Tensile force caused by the pinch effect

### 6.1. Characteristic dimensions and parameters

Sub-conductors are considered to clash effectively if

$$a_s/d_s \leq 2,0 \text{ and } l_s \geq 50 a_s \text{ or } a_s/d_s \leq 2,5 \text{ and } l_s \geq 70 a_s \quad \text{Clash effectively? No} \quad (43)$$

$$\text{Conclusion} \quad \text{Calculation required} \quad (44)$$

The short-circuit current force is given by:

$$F_v = (n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \frac{v_2}{v_3} \quad F_v = 41,28894 \quad \text{kN} \quad (45)$$

where

$$I_k'' \text{ is higher of the 3-phase and line to earth initial sc currents} \quad I_k'' = 63 \quad \text{kA}$$

$$v_1 = f \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{(a_s - d_s) m_s'}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_{k3}''}{n} \right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} \quad v_1 = 2,417966 \quad (46)$$

according to IEC 60865-1, A.6 Figure 8, and A.7 Figure 9

$$v_3 = \frac{d_s / a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \frac{\sqrt{(a_s / d_s) - 1}}{\arctan \sqrt{(a_s / d_s) - 1}}$$

$$v_2 = 2,217392$$

$$v_3 = 0,250454$$

The strain factors are:

$$\varepsilon_{\text{stf}} = 1,5 \frac{F_{\text{stf}} l_s^2 N_f}{(a_s - d_s)^2} \left( \sin \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad \varepsilon_{\text{sth}} = 1,5 \frac{F_{\text{sth}} l_s^2 N_h}{(a_s - d_s)^2} \left( \sin \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad \begin{array}{l} \varepsilon_{\text{stf}} = 1,348298 \\ \varepsilon_{\text{sth}} = 1,126687 \end{array} \quad (47)$$

$$\varepsilon_{\text{pif}} = 0,375n \frac{F_{\text{pif}} l_s^3 N_f}{(a_s - d_s)^3} \left( \sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad \varepsilon_{\text{pih}} = 0,375n \frac{F_{\text{pih}} l_s^3 N_h}{(a_s - d_s)^3} \left( \sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad \begin{array}{l} \varepsilon_{\text{pif}} = 31,72761 \\ \varepsilon_{\text{pih}} = 32,40447 \end{array} \quad (48)$$

The parameter that determines the bundle configuration during short-circuit current is:

$$j_f = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{pif}}}{1 + \varepsilon_{\text{stf}}}} \quad j_h = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{pih}}}{1 + \varepsilon_{\text{sth}}}} \quad \begin{array}{l} j_f = 3,675717 \\ j_h = 3,903469 \end{array} \quad (49)$$

$j \geq 1$ : The sub-conductors clash

$j < 1$ : The sub-conductors reduce their distance but do not clash

## 6.2 Tensile force $F_{\text{pi}}$ in the case of clashing sub-conductors

If  $j \geq 1$ , the tensile force  $F_{\text{pi}}$  is obtained from

$$F_{\text{pif}} = F_{\text{stf}} \left( 1 + \frac{v_{\text{ef}}}{\varepsilon_{\text{stf}}} \zeta_f \right) \quad F_{\text{pih}} = F_{\text{sth}} \left( 1 + \frac{v_{\text{eh}}}{\varepsilon_{\text{sth}}} \zeta_h \right) \quad \begin{array}{l} F_{\text{pif}} = 79,24261 \text{ kN} \\ F_{\text{pih}} = 73,86175 \text{ kN} \end{array} \quad (50)$$

where

$\zeta_f$  is a real solution of:

$$\zeta_f^3 + \varepsilon_{\text{stf}} \zeta_f^2 - \varepsilon_{\text{pif}} = 0$$

$\zeta_h$  is a real solution of:

$$\zeta_h^3 + \varepsilon_{\text{sth}} \zeta_h^2 - \varepsilon_{\text{pih}} = 0$$

$$f(\zeta_f) = 0$$

$$\zeta_f = 2,774221 \quad (51)$$

$$f(\zeta_h) = 0$$

$$\zeta_h = 2,853372$$

$$v_{\text{ef}} = \frac{1}{2} + \left[ \frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_o}{2\pi} \left( \frac{I_k}{n} \right)^2 N_f v_2 \left( \frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \frac{\left( \sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\zeta_f^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} = 1,181206 \quad (52)$$

$$v_{\text{eh}} = \frac{1}{2} + \left[ \frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_o}{2\pi} \left( \frac{I_k}{n} \right)^2 N_h v_2 \left( \frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \frac{\left( \sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\zeta_h^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} = 1,148269$$

$$\text{where } v_4 = (a_s - d_s) / d_s$$

$$v_4 = 8,302326 \quad (53)$$

The tensile force  $F_{\text{pi}}$  is the maximum value of  $F_{\text{pif}}$  and  $F_{\text{pih}}$

$$F_{\text{pi}} = 79,24261 \text{ kN}$$

## 7. Conclusions

### 7.1 Structure loads due to electromagnetic effects

Sub-conductors are considered to clash but not effectively

To the structure and insulators, the maximum value of  $F_t$ ,  $F_f$  and  $F_{pi}$  shall be applied as a static load: 79,24 kN

To the connectors, the maximum value of  $F_t$ ,  $F_f$  and  $F_{pi}$  shall be applied as a static load: 79,24 kN

**7.2 Horizontal span displacement  $b_h$  and minimum air clearance  $a_{min}$**

Horizontal span displacement  $b_h$  1,33 m

Minimum air clearance  $a_{min}$  2,34 m

## CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENT EFFECTS IN OPEN AIR HIGH-VOLTAGE SUBSTATIONS (according to IEC 60865)

### Thermal effect on bare conductors

#### 0. Project data

Customer	Aalto University School of Science and Technology
Substation	IEC 60865-2
Bay	Example 6
Date	13.2.2010
Operator	Rauno Hirvonen
Document number	Master's Thesis: Appendix B
Revision	-

#### 1. Calculation data

##### System

System voltage	$U$	=	10	kV
System frequency	$f$	=	50	Hz
Initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.)	$I_k''$	=	24	kA
Steady-state short-circuit current (r.m.s.)	$I_k$	=	19,2	kA
Factor to calculate the peak short-circuit current	$\kappa$	=	1,8	
Rated short-time	$T_{kr}$	=	1	s
Duration of the short-circuit current	$T_k$	=	0,8	s

##### Conductor

Material	ACSR			
Cross-section	$A$	=	600	mm <sup>2</sup>
Temperature at the beginning of the short circuit	$\theta_b$	=	65	°C
Temperature at the end of the short circuit	$\theta_e$	=	170	°C

#### 2. Calculations

The rated short-time withstand current density  $S_{thr}$  is:

$$S_{thr} = \frac{K}{\sqrt{T_{kr}}}$$

$$S_{thr} = 80,6767 \text{ A/mm}^2$$

where

$$K = \sqrt{\frac{\kappa_{20} c p}{\alpha_{20}} \cdot \ln \frac{1 + \alpha_{20} (\theta_e - 20^\circ \text{C})}{1 + \alpha_{20} (\theta_b - 20^\circ \text{C})}}$$

$$K = 8,1\text{E}+07 \text{ A}\sqrt{\text{s/m}^2}$$

according to IEC 60865-1, A.9 Figure 13 material factors are:

Specific thermal capacity	$c$	=	910	J/(kg°C)
Specific mass	$\rho$	=	2700	kg/m <sup>3</sup>
Specific conductivity at 20 °C	$\kappa_{20}$	=	3,5E+07	1/(Ωm)
Temperature coefficient	$\alpha_{20}$	=	0,004	1/°C

The thermal equivalent short-time current is:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n} \quad I_{th} = 22,9794 \text{ kA} \quad (63)$$

where

according to IEC 60865-1, Figure 12a and appendix A.8, factor  $m$  is:

$$m = \frac{1}{2fT_k \ln(\kappa-1)} [e^{4fT_k \ln(\kappa-1)} - 1] \quad m = 0,05602$$

according to IEC 60865-1, Figure 12b and appendix A.8, factor  $n$  is:

when  $I_k''/I_k = 1$ ,  $n = 1$

$$\text{ratio } I_k''/I_k = 1,25$$

when  $I_k''/I_k \geq 1,25$

$$\begin{aligned} n = \frac{1}{(I_k''/I_k)^2} & \left[ 1 + \frac{T_d'}{20T_k} \left( 1 - e^{-20T_k/T_d'} \right) \cdot \left( \frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right)^2 + \frac{T_d'}{2T_k} \left( 1 - e^{-2T_k/T_d'} \right) \cdot \left( \frac{I_k'}{I_k} - 1 \right)^2 \right. \\ & + \frac{T_d'}{5T_k} \left( 1 - e^{-10T_k/T_d'} \right) \cdot \left( \frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right) + \frac{2T_d'}{T_k} \left( 1 - e^{-T_k/T_d'} \right) \cdot \left( \frac{I_k'}{I_k} - 1 \right) \\ & \left. + \frac{T_d'}{5,051T_k} \left( 1 - e^{-10,1T_k/T_d'} \right) \cdot \left( \frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right) \cdot \left( \frac{I_k'}{I_k} - 1 \right) \right] = 0,860739 \end{aligned}$$

where

$$\frac{I_k'}{I_k} = \frac{I_k''/I_k}{0,88 + 0,17I_k''/I_k} \quad I_k'/I_k = 1,14416 \text{ kA}$$

$$T_d' = \frac{3,1s}{I_k'/I_k} \quad T_d' = 2,7094 \text{ s}$$

when  $1 < I_k''/I_k < 1,25$ ,  $n$  is an average from the above values

$$\text{From the inequalities above} \quad n = 0,86074$$

Short-time current density  $S_{th} = I_{th}/A$

$$S_{th} = 38,299 \text{ A/mm}^2$$

The conductors have sufficient thermal strength if:

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad 38,3 \leq 90,1993 \text{ A/mm}^2 \quad (67)$$

### 3. Conclusion

The conductors have sufficient thermal short-circuit strength.